

**Ein neues Verfahren
zur Sprachkommunikation
über die menschliche Haut**

von

Karl-Werner Biber
aus Saulgau/Wttbg.

1961



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Physiologischen Institut der Universität Erlangen
Direktor: Prof. Dr. med. W.D. K e i d e l

Ein neues Verfahren zur Sprachkommunikation
über die menschliche Haut

Inaugural - Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Friedrich-Alexander-Universität
zu
Erlangen

Vorgelegt von
Karl-Werner B i b e r
aus Saulgau/Württ.

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen.



Dekan: Prof. Dr. med. E. S c h r e c k
Referent: Prof. Dr. med. W.D. K e i d e l

Tag der mündlichen Prüfung: 31.1.1961

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Einleitung.....	5
B. Problemstellung.....	8
C. Eigene Versuche.....	10
I. Methodik.....	10
a) Vibrationsgerät zur Übermittlung der adäquat transformierten mensch- lichen Sprache.....	10
b) Herstellung der Übungs- und Test- bänder.....	17
c) Versuchsanordnung.....	18
d) Auswahl der Versuchspersonen.....	19
II. Ergebnisse.....	19
a) Übungen mit bekannten Wortreihen.....	19
α . Zahl und Art der richtig erkannten Buchstaben.....	20
β . Zeitgang der Übungskurven.....	27
γ . Inter- und intraindividuelle Streuung.....	29
δ . Subjektiver Schwierigkeitsgrad.....	33
ϵ . Zahl der richtig erkannten Worte.....	35
ξ . Vergleich des Übungsfaktors für Buchstaben und Worte.....	39
b) Übungen mit unbekannten Wortreihen.....	41
c) Bestimmung des optimalen Verlangsa- mungsfaktors der Bandgeschwindigkeit....	44
α . Theoretische Erwartung.....	44
β . Gemessenes optimales Zeitverhältnis.....	45

	Seite
D. Deutung der Ergebnisse.....	46
I. Übungszeitgang.....	46
II. Begründung des optimalen Verlangsamungs- faktors.....	50
III. Kritischer Vergleich mit anderen Verfahren zur taktilen Sprachkommunikation.....	54
E. Zusammenfassung.....	64
F. Literaturverzeichnis.....	65

A. Einleitung

Bei Menschen, deren Corti'sche Organe vollständig zerstört sind, ist die akustische Informationsleitung zum Zentralnervensystem unterbrochen und damit das Zustandekommen jeder Hörempfindung unmöglich gemacht. Trotzdem ist eine andere sinnesphysiologische Informationsleitung, etwa über das Auge oder die Haut, auch für die gewöhnlich akustisch perzipierten Informationsinhalte auch dann noch möglich. Der zweifellos wichtigste akustische Informationsinhalt ist die Sprache. Eine optische Sprachübertragung, bei der das Auge die Rolle des ausgefallenen Ohres übernimmt, ist als "visible speech" bekannt geworden. Aber auch für die Sprachübertragung über die Haut ist eine ganze Reihe von Wegen aufgezeigt worden, bei denen die Sprachschwingungen entweder mittels eines geeigneten Vibrators mechanisch oder nach Umformung in Wechselströme elektrisch den Hautrezeptoren angeboten werden.

So haben A n d e r s o n und M u n s o n (1) von den Bell Telephone Laboratories 1951 ein Patent angemeldet für "A system for conveying intelligence in the form of signals, comprising means for producing the signals in electrical form, a plurality of spaced electrodes adapted to be placed in intimate contact with the shine of an observer, means for dividing the electrical signals into portions of significant intensities, and means for applying the signals in each portion to a respective pair of electrodes".

Das Projekt "Felix" der M.I.T. Electronics Laboratory stellt ebenfalls einen relativ jungen Versuch dar und arbeitet mit angelegten Wechselströmen verschiedener Frequenzen; in diesem Fall durch ein Filtersystem von 7 Kanälen.

G e l d a r d (1) meint zu diesen Versuchen: "sicherlich haben wir nicht das ausreichende Verständnis, das uns erlaubte, electrocutane Signale anders als in der größten Weise zu handhaben." Und weiter schreibt er in Bezug auf die mechanischen Reize: "... wir haben nicht nur viel gelernt über die Wirkungsweise mechanischer Kräfte auf der Haut, sondern wir sind sogar in der Lage, brauchbare Übermittlungssysteme herzustellen und zum Arbeiten zu bringen." Was ist also mit der mechanischen Ankoppelungsart möglich?

Schon in den Dreißigerjahren wurde von G a u l t der "Teletaktor" entwickelt, ein Gerät, das nicht nur in Amerika sehr bekannt geworden ist. - David K a t z beschritt in Deutschland einen vergleichbaren Weg, indem er kombinierte elektrodynamische und magnetische Lautsprechereinheiten als Vibratoren verwendete. Als Überträger der Auslenkungen der Lautsprecher wurden Stahlstifte benutzt, welche auf die Haut aufgesetzt wurden. Bei beiden Verfahren war jedoch ein entscheidender Fehler gemacht worden: Die Haut empfindet wohl Frequenzunterschiede, aber die Frequenzunterschiedsschwelle liegt hoch, etwa bei 10 %. Bei sehr niedrigen Frequenzen (20-50 Hz) sind die Unterschiedsschwellen der Haut nicht wesentlich geringer als die des Ohres, wobei es keine Rolle spielt, ob elektrisch oder mechanisch gereizt wird. Schwerwiegend ist die Beobachtung, daß taktil die Empfindung Frequenzänderung von der bei einer Amplitudenänderung ausgelösten Empfindung kaum unterschieden werden kann. Ein mehr oder weniger an Auslenkung kann als schnellere oder langsamere Vibration gedeutet werden (1). So bleiben also praktisch nur drei voneinander unabhängige Dimensionen, welche der Vibrationssinn zu unterscheiden vermag, übrig: Amplitude (oder Frequenz), Dauer und Lokalisation des Reizes.

Auf dieser Tatsache aufbauend, wurden in den letzten

Jahren verschiedene verbesserte Vibrationsgeräte entwickelt, wie etwa das Gerät von G e l d a r d (1). Dieses besteht aus fünf Vibratoren, die derart angeordnet sind, daß einer der Vibratoren in der Mitte eines Quadrates liegt, dessen Ecken von den restlichen vier Vibratoren gebildet werden. Neben dieser Ortsverteilung benützt G e l d a r d drei unterschiedliche Reizintensitäten und drei verschiedene Reizzeiten. Damit steht ihm ein System zur Verfügung, welches mit 45 Reizgestalten als Elementen arbeitet. Allerdings muß dann jede Information verschlüsselt werden.

Ein anderes Gerät, bei dem die Chiffrierung des Buchstabenmaterials nicht erforderlich ist, wurde von F a n t (10) angegeben. Es handelt sich hierbei um einen "Apparat für visuelle und taktil-vibratorische Sprachüberführung", bei welchem das ganze Sprachfrequenzgebiet in zehn Einzelbänder zerlegt und jedes dieser Bänder einem der zehn Fingervibratoren zugeleitet wird. Vervollständigt wird das Gerät durch ein 16-Kanal-System von Anzeigelampen, welche ein optisches Bild des Eingangsignals geben.

Bei dem Gerät von R.W. G u e l k e (11) endlich wird das Sprachfrequenzgebiet ebenfalls in verschiedene Bänder zerlegt, welche einzeln auf je ein Vibrations-system übertragen werden.

In Abschnitt D dieser Arbeit wird auf diese Vibrationsapparate näher eingegangen werden, so daß auf eine genauere Beschreibung an dieser Stelle verzichtet werden darf.

B. Problemstellung

Wie schon in der Einleitung aufgezeigt wurde, ist es möglich, die menschliche Sprache auch unter Umgehung des Gehörs wahrzunehmen. Das zu dieser unphysiologischen Art der Sprachwahrnehmung herangezogene menschliche Organ, ist im vorliegenden Falle die Haut. Für die Reizübermittlung erscheint der Vibrationssinn als der geeignetste, da er gegenüber dem Schmerz- und Temperatursinn den Vorteil einer relativ niedrigen Reizschwelle, geringen Adaptation und kurzen Anklingzeit aufweist. Trotzdem ist es nicht einfach, den Vibrationssinn zur Informationsübermittlung zu nutzen, weil damit ein Vibrationsreiz nur hinsichtlich seiner Amplitude oder Frequenz, seiner Dauer und seiner Lokalisation identifiziert werden kann (2). Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen gelang, wie beschrieben, die erfolgreiche Anwendung verschiedener Apparate zur taktilen Sprachkommunikation, wobei einmal ein Code-system Verwendung fand, das auf den Parametern Dauer und Intensität einer sinusförmigen Schwingung und Ort des Reizes basierte (G e l d a r d (1)) oder, wie bei G u e l k e und F a n t , der Sprachfrequenzbereich in zehn Frequenzbänder aufgeteilt wurde, die örtlich getrennten Vibratoren zugeführt wurden, um die Frequenzunterschiedsempfindlichkeit der Anordnung zu verbessern.

Wir haben nun ein anderes, von K e i d e l (8) beschriebenes Gerät experimentell untersucht, dessen System hier nur kurz erläutert werden soll: Sprache wird bei einer Bandgeschwindigkeit von 38 cm/sec. auf ein Magnetonband aufgenommen. Die Abspielgeschwindigkeit wird auf 4,8 cm/sec. heruntersgesetzt. Damit wird der Frequenzbereich der Sprache, normal zwischen 300 und 3000 Hz liegend, auf einen Bereich von 40 bis 400 Hz transformiert. Diese nie-

deren Frequenzen werden nun auf einen besonderen Vibrator, ein vergrößertes Modell des Innenohres, übertragen. Ein solches Modell ist von B é k é s y (3) angegeben worden. Wird die Volarseite des Unterarmes auf das Modell gelegt, so erregt jede Frequenz einen anderen Punkt der Haut. Bei dieser Art der "Vibrationssprache" wird die maximale Unterschiedsempfindlichkeit und die geringste Reizschwelle für Vibrationsreize der taktilen Rezeptoren, welche etwa bei 200 Hz liegt, ausgenutzt. Außerdem ist dieses System auch dem zeitlichen Auflösungsvermögen der Haut gut angepaßt, welches ungefähr achtmal kleiner ist als dasjenige des Ohres (4).

Ziel der hier vorliegenden folgenden Untersuchungen war nun, experimentell festzustellen:

1. Welche Übungszeiten zur Erlernung dieser von K e i d e l inaugurierten Vibrationssprache erforderlich sind und

2. das optimale Übersetzungsverhältnis für Aufsprache- und Wiedergabebandgeschwindigkeit experimentell zu bestimmen.

C. Eigene Versuche

I. Methodik

a) Vibrationsgerät zur Übermittlung der adäquat transformierten menschlichen Sprache

Wie schon ausgeführt, ist die menschliche Haut in der Lage, Vibrationsreize besonders gut nach ihrer Dauer, ihrer Amplitude oder Frequenz und ihrer Lokalisation zu unterscheiden. Die absolute Reizschwelle des Vibrations-sinnes findet man daher nach B é k é s y bei einer Frequenz von etwa 200 Schwingungen pro Sekunde.

Das Vibrationsgerät muß also so gebaut sein, daß

1. der Frequenzbereich der menschlichen Sprache.
(300-3000 Hz) transformiert werden kann auf einen Bereich zwischen 40 und 400 Hz,
2. die im entsprechenden Zeitverhältnis gegebene Information zerlegt werden kann in drei voneinander unabhängige Dimensionen, nämlich Amplitude, Dauer und Lokalisation.

Dieser letzten Forderung entspricht vorzüglich das von B é k é s y angegebene C o c h l e a - Modell.

Dieses Gerät und seine Konstruktionsmerkmale seien im folgenden kurz beschrieben: Das mechanische Modell der Cochlea besteht aus einem dünnwandigen Messingrohr mit einem inneren Durchmesser von 5,5 cm und einer Länge von 30 cm und stellt eine Analogie zur scala vestibuli dar. Das Rohr ist auf der einen Seite mit einem biegungssteifen Blech, auf der anderen mit einer Druckdose aus Tombak verschlossen. Das Metall-Rohr hat in der Längsrichtung einen 2,3 cm breiten Schlitz. Das Ganze erhält nun einen Mantel aus Polyvinylplastik, der eine Membran über dem Schlitz bildet. Die Breite der Membran ist über

die ganze Länge hin konstant. Die Dicke der Membran entlang dem Schlitz jedoch variiert entsprechend der ortsabhängigen Basilarmembransteifheit der menschlichen Cochlea. Der Ort maximaler Auslenkung ist dementsprechend abhängig von der Vibrationsfrequenz. Die Membrandicke des Modells variiert mit dem Ort mit steifstem Teil in Druckdosennähe. Dort wird auch die höchste Vibrationsfrequenz abgebildet. Die Abhängigkeit der Membransteife vom Ort ist in der nächsten Abbildung zu sehen (v. B é k é s y (3)).

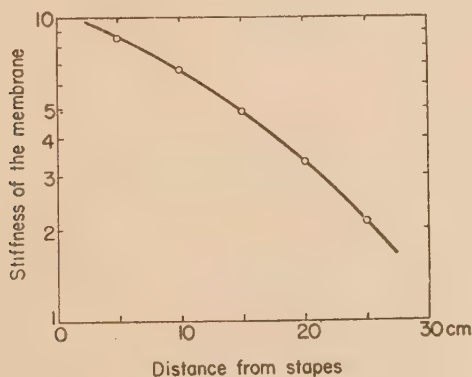


Abb. 1: Membransteife des Modells in Abhängigkeit vom Ort. Nach v. B é k é s y (3).

Der Membran aufgesetzt ist eine Leiste, ebenfalls aus Polyvinylchlorid, von etwa 3 mm Stärke. Diese Leiste dient dem Kontakt zwischen der Membran und dem aufliegenden Unterarm der Versuchsperson. Das ganze Cochlea-Modell ist blasenfrei mit Wasser gefüllt. Die nächste Abbildung zeigt zur Veranschaulichung einen Modellquerschnitt.

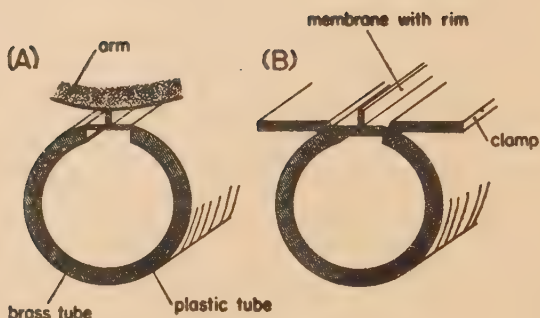


Abb. 2: (3) Querschnitt durch das Cochlea-Modell.
In A und B sieht man die Dickenzunahme der
Membran zur Druckdose hin.

Der Modellaufbau erlaubt eine räumliche Dispersion der Frequenzen etwa zwischen 40 und 400 Hz. Wenn der Unterarm dem Modell aufliegt, erregt also jede Frequenz einen entsprechenden Punkt auf der Haut des Unterarms.

Die Breite der bei einer bestimmten Vibrationsfrequenz schwingenden Modellmembran ist größer als die räumliche Ausdehnung der Empfindung, wie schon v. B é k é s y beschrieben hat. Diese Beobachtung, die alle unsere Versuchspersonen bestätigt haben, ist in der nächsten Abbildung schematisch dargestellt. Sie kommt durch Hemmungs-schaltungen im terminalen Netzwerk der Hautrezeptoren zustande. Ähnliche Hemmungsschaltungen dürften auch bei der akustischen Informationsverarbeitung im Ohr eine wichtige Rolle spielen.

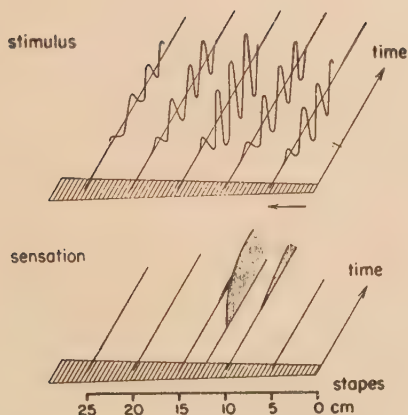


Abb. 3: Durch Hemmungsschaltungen der Hautrezeptoren ist die Empfindung in der räumlichen Ausdehnung gegenüber der Amplitudenumhüllenden der Modellmembran zusammengedrückt. Oberes Bild: Schwingungsform, unteres Bild: Empfindung.

Nach v. B é k é s y (3). Sinusdauer-ton von 125 Hz.

Abschließend läßt sich also sagen, daß bei unseren Versuchen ein auf die Haut Übertragenes, den Informationsverarbeitungsvorgängen im Ohr analoges Verfahren Anwendung findet: eine grobe Frequenzanalyse der Vibrationen wird durch das Cochlea-Modell erreicht, die feinere Differenzierung besorgt das periphere und besonders das zentrale Nervensystem.

Als Schwingungserreger ist diesem Modell ein entsprechend umgebautes Antriebssystem eines elektrodynamischen Lautsprechers (Endleistung ca. 10 Watt) vorgeschaltet.

An der auf einen Durchmesser von 7 cm reduzierten

Trichtermembran des Lautsprechers wurde mit Hilfe eines dreifußförmigen Drahtbügels ein Stahlstift befestigt. Dieser wiederum wurde mittels dreier Stahldrähte genau zentriert und in dieser Stellung gehalten. Neben der Fixation des Stiftes sollte durch diese Art der Verspannung (vergrößerte Rückstellkraft) eine Erhöhung der Eigenschwingungszahl erreicht werden.

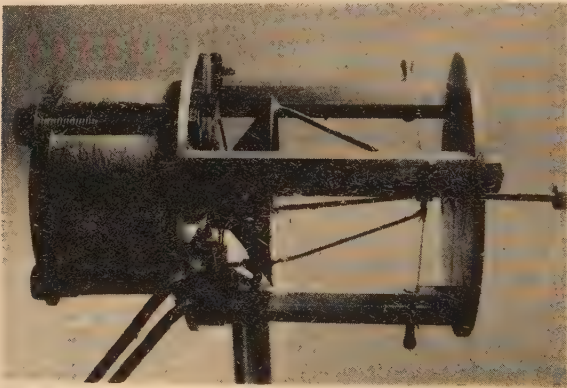


Abb. 4: Ansicht des zum Vibrator umgebauten Lautsprechers.

Der Stahlstift des Vibrators wurde mit der Druckdose des Cochlea-Modells fest verschraubt.

Zur besseren Übersicht werden der Querschnitt durch Modell und Vibrator, sowie eine Gesamtaufnahme derselben in den folgenden zwei Abbildungen gezeigt.

- 15 -

- 15 -

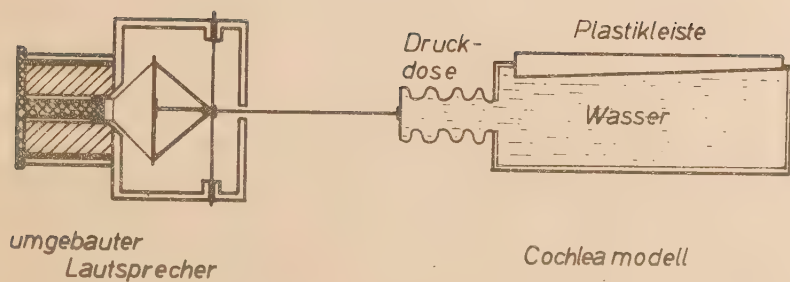


Abb. 5: Querschnitt durch Cochlea-Modell und Vibrator.



Abb. 6: Ansicht von Vibrator und Cochlea-Modell.

Für den A n t r i e b des Vibrators fanden ein Vor- und ein Hauptverstärker Verwendung, deren Schaltung innerhalb der ganzen Versuchsanordnung dem unten angefügten Blockschema entnommen werden kann.

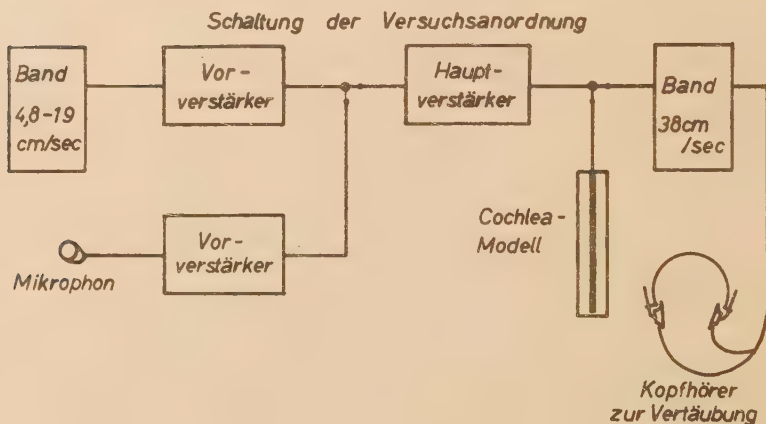


Abb. 7: Schaltungsübersicht über die gesamte Versuchsanordnung.

Zum Aufbau der Versuchsanordnung wurden größtenteils im Institut angefertigte Bauelemente verwendet: zwei Vorverstärker, ein Hauptverstärker, ein Tonbandgerät mit einer Bandgeschwindigkeit von 38 cm/sec., ein Mikrophon und ein Kopfhörerpaar. - Die Zusammenschaltung wird im Abschnitt "Versuchsanordnung" näher dargestellt. An dieser Stelle sei nur das Gerät zur Frequenztransformation beschrieben: es handelt sich hierbei um ein Tonbandgerät,

auf welchem sich Bänder bei extrem verlangsamten Laufgeschwindigkeiten "endlos" abspielen lassen. Das Tonband läuft dabei über vier Hartgummirollen, welche zuvor einer Behandlung mit einem Antistatikum unterzogen wurden. Zum Bandtransport wurde ein Synchronmotor, wie er in Plattenspielern benützt wird, verwendet. Die Variation der Bandgeschwindigkeit (4, 8-19 cm/sec.) wurde durch Aufsetzen von Hartgummitreibrädern mit den der gewünschten Bandgeschwindigkeit entsprechenden Durchmessern erreicht. Zum Abgreifen des Tones wurde ein käuflicher Abhörkopf eingebaut. Sämtliche Bauelemente waren auf einer Sperrholzplatte montiert.

b) Herstellung der Übungs- und Testbänder

Über ein Tonbandgerät wurden bei einer Bandgeschwindigkeit von 38 cm/sec. die Übungs- und Testworte auf Band aufgenommen. Auf die Übungsbänder wurden je 7 Worte aufgenommen, im Gegensatz dazu nur 2 Worte auf die Testbänder. Diese Unterteilung hat sich als vorteilhaft erwiesen, da die Versuchspersonen anscheinend bei 7 Worten je Band sich die Vibrationseindrücke besonders gut merken können. Die Bänder wurden sämtlich endlos geklebt, so daß sie nicht laufend zurückgespult werden mußten. Die hohe Aufnahme- geschwindigkeit wurde gewählt, um bei den benutzten niederen Abspielgeschwindigkeiten den Verzerrungsfaktor möglichst klein zu halten.

Insgesamt wurden 19 solcher Tonbänder hergestellt.

Die Übungs- und Testworte erfuhren eine Unterteilung in 3 Gruppen zu je 7 Worten unter Berücksichtigung grober Frequenzunterschiede:

Gruppe I : i, e, ä und Zischlaute wie st, s, z.

Gruppe II : a, au, eu und l, g, p.

Gruppe III : o, u und Brummlaute wie m, n, w.

Eine entsprechende Einteilung erfuhren diejenigen Worte, deren Buchstaben den Versuchspersonen bekannt waren, nicht aber deren Wortbedeutung.

Außerdem wurde ein 45 Minutenband hergestellt, auf dem das Zischgeräusch ausströmender Preßluft aufgezeichnet war.

c) Versuchsanordnung

Die Übungs- bzw. Testbänder wurden "endlos" mit $V=4,8$ cm/sec., $V=9,5$ cm/sec. und $V=19$ cm/sec. auf dem für diesen Zweck gebauten Gerät abgespielt. Die abgegriffenen elektrischen Tonäquivalente wurden, nach Verstärkung in einem Vor- und einem Hautverstärker, auf den dem Cochlea-Modell vorgeschalteten Vibrator gegeben. Die Versuchsperson fühlte nun mit dem Unterarm, welcher mit der Volarseite auf dem Cochlea-Modell auflag, die dem gesprochenen Wort entsprechenden Impulse. - Um das Klirren der Membranaufhängung des Vibrators zu übertönen, wurden die Versuchspersonen durch das Preßluftgeräusch, welches über Kopfhörer appliziert wurde, vertäuscht. Diese Maßnahme hat sich als notwendig erwiesen, da Normalhörende durchaus in der Lage sind, sich anhand der Klirrgeräusche über den Inhalt eines Bandes zu informieren.

Die Versuchsergebnisse wurden nach zwei Gesichtspunkten aufgeschlüsselt:

1. Wieviele Buchstaben wurden richtig erkannt.
2. Wieviele Worte wurden richtig erkannt.

Die Aufzeichnung der Werte für die richtig erkannte Wortgruppe brauchte nicht zu erfolgen, da die Wortgruppe in jedem Falle richtig erkannt wurde.

Die Ergebnisse wurden dadurch ermittelt, daß nach einer gewissen Übungszeit die den Übungsbändern entsprechenden Testbänder abgehört wurden. Die angegebenen Werte

bezeichnen, wieviel vom Hundert der fraglichen Buchstaben bzw. Worte richtig erkannt wurden.

d) Auswahl der Versuchspersonen

Zur Verfügung standen 4 Versuchspersonen:

- A.H. = Herr A. Heinemann, stud.rer.pol., 27 Jahre alt, sehr musikalisch.
G.S. = Herr G. Schottky, stud.med., 23 Jahre alt, musikalisch durchschnittlich begabt.
G.Schw. = Herr G. Schweizer, stud.jur., 24 Jahre, keinerlei Gefühl für Rhythmus.
E.S. = Fräulein E. Sulzbacher, 23 Jahre, sehr musikalisch

Das Alter der Versuchspersonen lag zwischen 23 und 27 Jahren. Es ist bekannt, daß mit zunehmendem Alter der Versuchspersonen (5) auch die Schwellenwerte für die Hautsinne erheblichen Schwankungen unterworfen sind, die sich insbesondere in einem Ansteigen der Schwellenwerte bemerkbar machen können. Daher schien es angezeigt, Versuchspersonen zu gewinnen, die etwa zu der selben Altersklasse zählen.

II. Ergebnisse

a) Übungen mit bekannten Wortreihen

Begonnen wurden die Übungen mit der Wortgruppe I und der theoretisch als optimal angesehenen Abspielgeschwindigkeit von 4,8 cm/sec., was einem Zeitverhältnis Aufnahme-Wiedergabe von 1:8 entspricht. Für diese Übungen ist ein großes Maß an Aufmerksamkeit und Konzentration erforderlich;

so erscheint es verständlich, daß das Vertäubungsgeräusch anfänglich als sehr störend und ablenkend empfunden wurde. Trotz der Gewöhnung an dieses Geräusch war es für alle Versuchspersonen sehr schwierig, die dem Unterarm angebotenen Vibrationsreize zu deuten und bewußt zu perzipieren; sie gaben an, Schwingungen und Kitzeln im Wechsel auf der ganzen Volarseite des Unterarms zu spüren, also Angaben, die nur schwer zu verwerten waren. Erst nach der 10. Übungsstunde wurden "S" und "Sch" unterschieden an der verschiedenen Dauer der entsprechenden taktilen Informationen. Trotzdem konnten sich die Versuchspersonen nur anhand einer Textvorlage auf den Übungsbändern orientieren. Da trotz weiteren intensiven Übens der erwartete Erfolg ausblieb, wurde nach der 14. Übungsstunde diese Bandgeschwindigkeit verlassen (4,8 cm/sec.) und die Übungen wurden fortgeführt mit Bandgeschwindigkeiten von 9,5 cm/sec. ($V=1:4$) und 19 cm/sec. ($V=1:2$). Die Bandgeschwindigkeit von 4,8 cm/sec. wurde weiterhin beibehalten in der Hoffnung, wenigstens einige statistisch verwertbaren Angaben zu erhalten. - Wir wurden nicht enttäuscht. -

4. Zahl und Art der richtig erkannten Buchstaben

In den folgenden Diagrammen sind die Mittelwerte der richtig erkannten Buchstaben, nach Wortgruppen und Versuchspersonen geordnet, dargestellt. Die Werte sind ermittelt worden für die Bandgeschwindigkeiten 4,8, 9,5 und 19 cm/sec. Die Übungszeit betreffende Zahlenangaben entsprechen der Gesamtübungszeit in Stunden, die eingeklammerten Werte bezeichnen die Übungsdauer für die betreffende Wortgruppe. - Die Testbänder wurden jeweils fünfmal gegeben.

Richtig erkannte Buchstaben der bekannten Wortreihen
in % für verschiedenes Geschwindigkeitsverhältnis nach der
angegebenen Zahl von Übungsstunden:

Gruppe 1
=====

Vp. A.H.

V Band	18 (15)	25 (17)	31 (19)	Übgstdn.
1:2	80	66	53	
1:4	93	93	93	
1:8	26	46	53	

Vp. G.S.

V Band	16 (15)	23 (17)	27 (19)	Übgstdn.
1:2	80	40	20	
1:4	100	80	100	
1:8	30	20	20	

Vp. G.Schw.

V Band	16 (15)	23 (17)	29 (19)	Übgstdn.
1:2	0	40	20	
1:4	50	80	60	
1:8	40	20	10	

Gruppe 2
=====

Vp. A.H.

V Band	18 (2)	25 (4)	31 (6)	Übgstdn.
1:2	43	41	45	
1:4	91	97	96	
1:8	11	32	50	

Vp. G.S.

V Band	16 (1)	20 (3)	23 (4)	27 (5)	Übgstdn.
1:2	50	8	50	25	
1:4	66	33	100	100	
1:8	33	16	50	25	

Vp. G.Schw.

V Band	16 (1)	20 (3)	23 (4)	29 (6)	32 (7)	Üst.
1:2	0	0	0	20	20	
1:4	0	0	16	100	100	
1:8	0	0	0	0	0	

Gruppe 3
=====

Vp. A.H.

V Band	18 (1)	25 (4)	31 (6)	Übgstdn.
1:2	25	23	26	
1:4	56	76	100	
1:8	25	14	29	

Vp. G.S

V Band	18 (1)	19 (2)	20 (3)	Übgstdn.
1:2	33	33	16	
1:4	66	66	66	
1:8	50	50	50	

Vp. G.Schw.

V Band	20 (1)	29 (4)	32 (5)	Übgstdn.
1:2	29	22	21	
1:4	41	74	86	
1:8	25	7	14	

Zeichnet man diese Mittelwerte in Schaubildern auf, so erhält man für Vp. A.H. für die Wortgruppe 1 folgendes Bild:

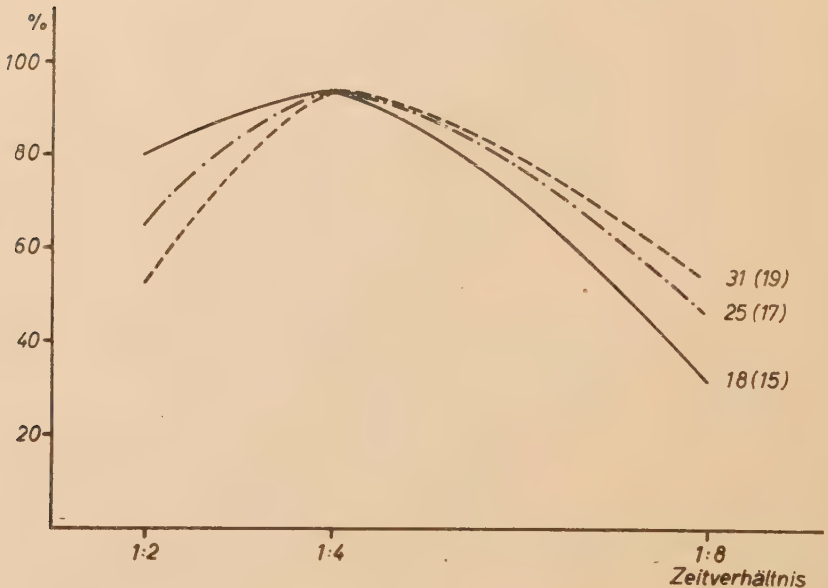


Abb. 8: Vp. A.H.: Mittelwerte der richtig erkannten Buchstaben für Wortgruppe 1, bekannt.

Das auffallendste an diesem Diagramm ist der absolute Wertgipfel für das Zeitverhältnis von 1:4 bei 9,5 cm/sec. Abspielbandgeschwindigkeit. Da eine graphische Darstellung der für jede Versuchsperson erhaltenen Mittelwerte nichts Neues bringt, seien der Vollständigkeit halber die Durchschnittswerte der Personengruppe für die Wortgruppen 2 und 3 in den folgenden Schaubildern dargestellt.

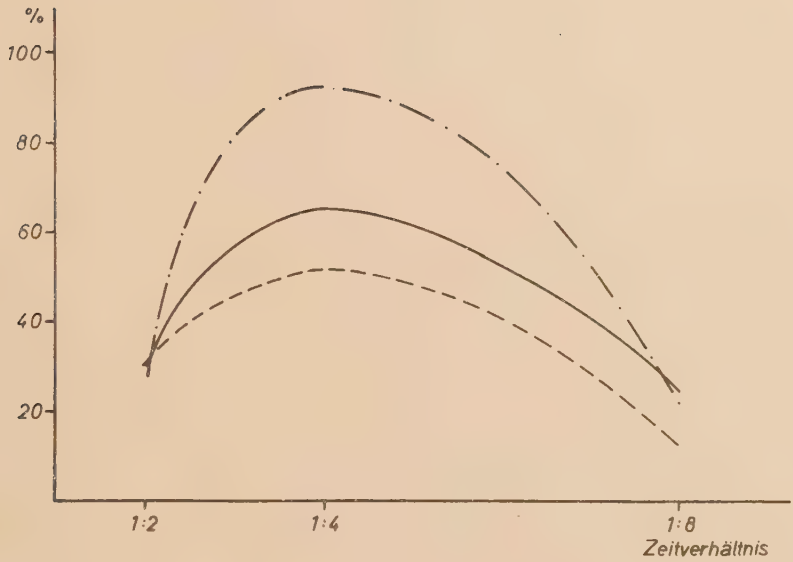


Abb. 9: Mittelwerte für bekannte Buchstaben Gruppe 2
für alle Vp.

----- = 16 (1), ————— = 23 (4), -·-·-·- = 29 (6).

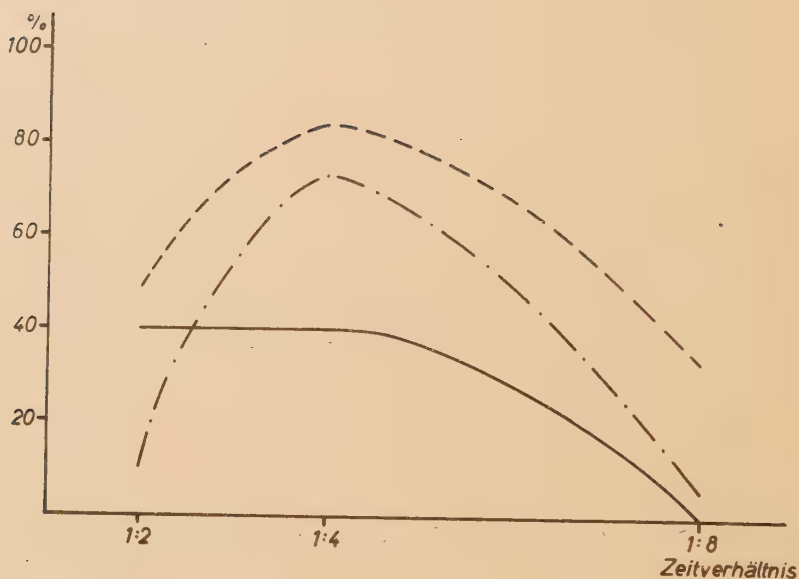


Abb. 10: Mittelwerte für bekannte Buchstaben Gruppe 3 für alle Vp.

— = 16 (1), -·-·- = 19 (4), ---- = 20 (5).

Zu den Werten, welche für richtig erkannte Buchstaben der bekannten Wortreihen ermittelt wurden, ist zu bemerken, daß diejenigen Werte, welche unter der 60 %-Grenze liegen, nur durch das sichere Erkennenkönnen der Buchstaben "S", "SS", "T" und "A" zustande kamen. Andere Buchstaben, wie z.B. "E", "SCH", "ST", "G", "O" und "U" ließen sich erst nach längerer Übung und dann meist auch nur aus dem Sinn des betreffenden Wortes erkennen. (Nähere Einzelheiten im übernächsten Abschnitt.)

Die bisherigen Ausführungen zusammenfassend läßt sich also sagen: es ist möglich, sich mit der am Institut ent-

wickelten "Vibrationssprache" zu verständigen. Im Verlaufe der Übungen wurde festgestellt, daß nicht das theoretisch erwartete Zeitverhältnis (1:8) optimale Ergebnisse brachte, sondern das Zeitverhältnis von 1:4, was zunächst überraschte.

β. Zeitgang der Übungskurven

Die Übungen wurden mit dem theoretisch als optimal erwarteten Zeitverhältnis von 1:8 bei 4,8 cm/sec. Abspiel-Bandgeschwindigkeit begonnen. Nach Gewöhnung der Versuchspersonen an das Vertäubungsgeräusch konnten sich diese ganz auf die dem Unterarm angebotenen Vibrationsempfindungen konzentrieren. Trotzdem war es ihnen nicht möglich, vor der 10. Übungsstunde eine bestimmte Vibrationsempfindung dem dazugehörigen Buchstaben entsprechend zu deuten. Die hauptsächliche Schwierigkeit bestand, wenn man von dem anfänglichen Kitzelgefühl absieht, darin, daß es den Versuchspersonen nur unter Zuhilfenahme des geschriebenen Textes möglich war, den Anfang und das Ende eines Wortes voneinander zu unterscheiden. Nach unserer Ansicht ist das darauf zurückzuführen, daß längerdauernde Vibrationseindrücke vom Kurzzeitgedächtnis nicht mehr entsprechend verarbeitet werden können, so daß ein kleineres Bandgeschwindigkeitsverhältnis bessere Ergebnisse liefert. Das ist einmal aus dem Wertegipfel bei einem Zeitverhältnis von 1:4 ersichtlich, wie auch aus der im nächsten Abschnitt gezeigten Übungskurve von Vp. E.S. (Beginn der Übungen mit $V=1:4$), wo schon nach der 4. Übungsstunde 60 % der Buchstaben als richtig erkannt dargestellt sind. - Auch aus der unten abgebildeten Übungskurve von Vp. A.H. lassen sich die Verhältnisse ablesen: nachdem ab der 14. Übungsstunde das Zeitverhältnis von 1:8 nur der Vergleichsmöglichkeit wegen beibehalten und zusätzlich mit $V=1:4$ und $V=1:2$ weitergeübt wurde, zeigt

sich, daß nach 18 Übungsstunden bei $V=1:4$ von Vp. A.H. bereits 80 % der Buchstaben richtig erkannt wurden. Bei $V=1:8$ sind es jedoch nur 20 %, was einem echten Leistungszuwachs bei $V=1:4$ gegenüber $V=1:8$ von 60 % entspricht. Die Übungsdauer für $V=1:4$ war 4 Stunden und der darauf zurückzuführende Leistungszuwachs ist dem bei Vp. E.S. nach 4 Übungsstunden ermittelten Wert (ebenfalls 60 %) vergleichbar.

Diese Befunde scheinen unsere Überlegung, die obere Leistungsgrenze des Kurzzeitgedächtnisses betreffend, zu bestätigen. - Die noch höher gewählte Bandgeschwindigkeit von $V=1:2$ bei 19 cm/sec. zeigt andererseits, daß auch in der anderen Richtung Grenzen gesetzt sind, wie die Leistungsdifferenz der Versuchspersonen nach 31 Übungsstunden zeigt: die Übungskurve zeigt einen Unterschied der ermittelten Werte für $V=1:4$ von fast 50 % gegenüber denen für $V=1:2$ und $V=1:8$, welche beide niedriger liegen.

Die Mittelwerte der Ergebnisse sind in Abb. 11 zusammengestellt.

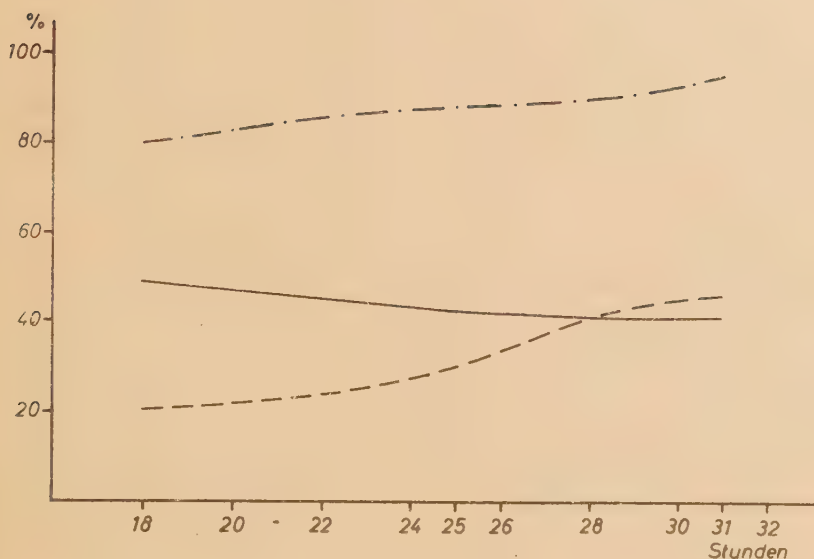


Abb. 11: Vp. A.H.: Mittelwerte der richtig erkannten Buchstaben für alle Wortgruppen der bekannten Reihen für alle 3 angewendeten Zeitverhältnisse.

———— = 1:2, - · - · - = 1:4, ----- = 1:8.

Y. Inter- und intraindividuelle Streuung

Die interindividuelle Streuung der Versuchsergebnisse ist im nächsten Bild dargestellt. Die mit der Zahl der Übungsstunden abnehmende Streubreite ist deutlich zu erkennen. Die anfänglich schlechtere Vp. holt die bessere im Lauf der Zeit fast ein.

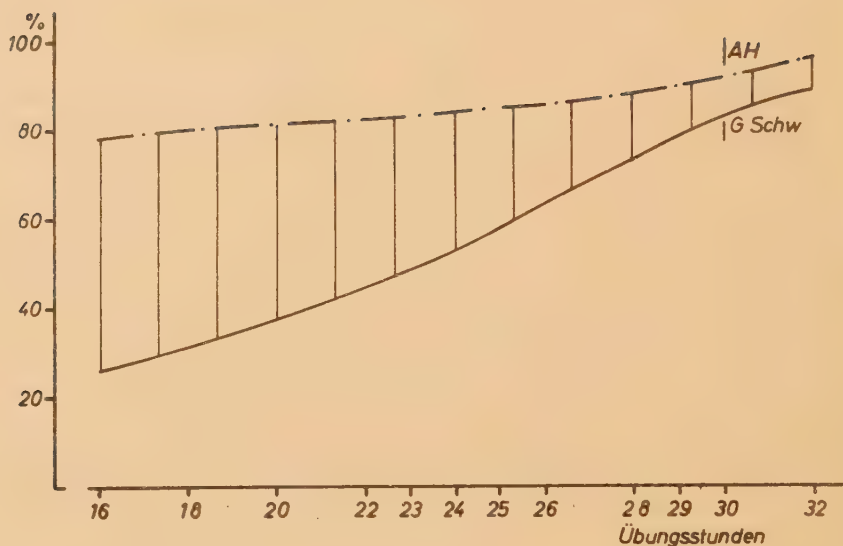


Abb. 12: Interindividuelle Streuung der Versuchsergebnisse, aufgezeigt an einem Vergleich der Übungskurven von Vp. A.H. und Vp. G.Schw. für richtig erkannte Buchstaben der 3 bekannten Wortgruppen, ermittelt bei einem Bandgeschwindigkeitsverhältnis von $V=1:4$.

Zum Schaubild ist weiter zu bemerken, daß Vp. A.H. sehr musikalisch ist und ein ausgeprägtes Gefühl für Rhythmus hat (Schlagzeuger), Eigenschaften, die Vp. G.Schw. völlig abgehen; ja, er ist nicht einmal in der Lage, zu irgendeiner Musik den Takt zu schlagen. Damit läßt sich die aus dem Bild ersichtliche interindividuelle Streuung leicht erklären, wenn wir uns daran erinnern, daß jeder Buchstabe mit der ihm eigenen Impulsstärke und -dauer, also mit dem ihm eigenen Rhythmus an der ihm eigenen

Stelle der Membran abgebildet wird.

Diese Kurve zeigt aber auch, daß das Fehlen jeglichen Gefühls für Rhythmus kein absolutes Hindernis darstellt für das Erlernen der "Vibrationssprache", wenn der Betreffende über einen normal reagierenden Vibrationssinn verfügt.

Am nächsten Beispiel läßt sich sehr schön die Bedeutung des Übungsfaktors demonstrieren. Das Schaubild zeigt wieder die intraindividuelle Streuung. Man erkennt, daß mit zunehmender Übung die Fehlerbreite sich verkleinert, während gleichzeitig die Zahl der richtig erkannten Buchstaben zunimmt. - Der steile Anstieg der Werte für richtig erkannte Buchstaben macht den entscheidenden Einfluß deutlich, den die Geschwindigkeit des Tonbandes auf die Deutung der Vibrationsempfindung hat; vergl. dazu den langsamen Anstieg der Kurven bei Bandgeschwindigkeiten von $V=1:8 = 4,8$ cm/sec. und $V=1:2 = 19$ cm/sec. - Weiter zeigt die Kurve, daß nach 16 Übungsstunden die Streuung gleich Null ist, d.h. die Vibrationsempfindungen werden dem dazugehörigen Buchstaben entsprechend sicher gedeutet. Hervorzuheben ist auch der für alle Lernvorgänge typische wellenförmige Verlauf der Übungskurve.

Buchstaben bekannter Wortgruppen richtig erkannt, ermittelt bei $V=1:4 = 9,5$ cm/sec.

Gruppe I

Vp. E.S.

4(4)	6(6)	8(8)	10(10)	12(12)	14(14)	16(16)	17(17)	18(18)	Üst.
60	80	69	87	100	100	100	100	100	
27	80	20	40	100	87	100	100	100	

Gruppe II

6(2)	8(4)	10(6)	12(8)	14(10)	16(12)	17(13)	18(14)	Übgstdn.
73	88	100	100	100	100	100	100	
58	65	60	100	100	100	100	100	

Gruppe III

8(2)	10(4)	12(6)	14(8)	16(10)	17(11)	18(12)	Übgstdn.
60	78	100	100	100	100	100	
42	56	100	100	100	100	100	

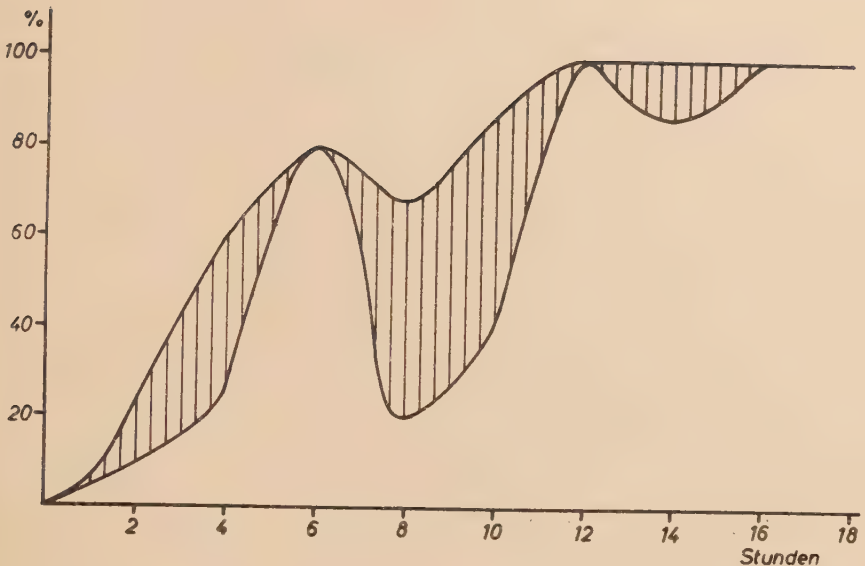


Abb. 13: Vp. E.S. Intraindividuelle Streuung. Beste und schlechteste Werte für richtig erkannte Buchstaben der Gruppe I der bekannten Wortreihe, ermittelt bei einem Zeitverhältnis von $V=1:4 = 9,5$ cm/sec.

§. Subjektiver Schwierigkeitsgrad

In diesem Abschnitt soll versucht werden, darzustellen, welchen Schwierigkeiten von Seiten der Versuchspersonen zu begegnen war und welche charakteristischen Vibrationseindrücke die Versuchspersonen zum Erkennen des entsprechenden Buchstabens ausnützten. Oder anders ausgedrückt, es soll nun versucht werden, vom Subjekt her all das zu beleuchten, was den Übungsfaktor und die Streu-

ung beeinflusst. Eine Vp. gab zu Protokoll: "Die erste Stunde der Übungsserie war von einem Gefühl völliger Untauglichkeit als Versuchsperson begleitet. Dies war auch noch in der zweiten Übungsstunde der Fall. Der Text lag wohl als Orientierungshilfe vor einem, doch waren die Impulse der Plastikleiste derart zahlreich, daß es zunächst aussichtslos erschien, sie voneinander zu trennen bzw. deren Lokalisation zu erkennen. Zwar fand man einen gewissen Rhythmus der aufeinanderfolgenden Impulse heraus und konnte sich anhand des vorliegenden Textes orientieren, welches Wort gerade an der Reihe sein könnte, aber erst nach der 3. Übungsstunde ließen sich einzelne Buchstaben anhand der Lokalisation ihres Ausschlages unterscheiden. Der Text war einem schon derart vertraut geworden, daß die Aufmerksamkeit sich ganz auf die Impulse am Arm konzentrieren konnte, auch wirkte das Preßluftgeräusch nicht mehr so störend. Zuerst ließ sich das "S" und darauf noch besser das "Doppel-S" erkennen. Aber schon das "Sch" bereitete wieder Schwierigkeiten, da es an der gleichen Stelle wie das "Doppel-S" lag und die gleichen Impulse gab. "Sch" unterschied sich aber von "Doppel-S" in der Dauer der Vibration, auch waren die Impulse kontinuierlicher und schlugen nicht so deutlich an. Das war schon der Anfang der Kombination von der Lokalisation und der Dauer der Impulse mit deren Rhythmus, was von nun an entscheidend für das Erkennen von weiteren Buchstaben werden sollte. Lokalisation, Dauer und Stärke der Impulse waren zum Erkennen der einzelnen Buchstaben zu ungenügend. So liegen z.B. "i" und "e" auf der gleichen Stelle, die Impulse waren gleich lang und gleich stark; das "i" ließ sich nur durch seinen schnelleren Rhythmus von "e" unterscheiden." Es folgen nun noch verschiedene Beispiele, die zu ähnlichen Ergebnissen führen. Die Aufzeichnung schließt mit der Feststellung: "In einem Fall, nämlich bei "e" und "ä", ließ sich ein Unterschied nur durch den Sinn des Wortes

feststellen."

Anmerkung: wenn Aussagen von Versuchspersonen zitiert werden, dann stammen diese aus einer schriftlichen Fixierung der subjektiven Eindrücke und Meinungen durch die Versuchspersonen selbst. Im Ausdruck wurden keine Veränderungen vorgenommen. - Mit einer Ausnahme sind alle Versuchspersonen Laien. - Obige Schilderung stammt von Vp. E. Sulzbacher und gilt für die Bandgeschwindigkeit $V=1:4 = 9,5$ cm/sec.

£. Zahl der richtig erkannten Worte

Zunächst sollen wieder die festgestellten Mittelwerte für richtig erkannte Worte für alle 4 Versuchspersonen in tabellarischer Übersicht zusammengefaßt dargestellt werden: Die Bedeutung der Gruppen (I hohe, II mittlere, III tiefe Frequenzen) ist auf Seite 17 ausführlich dargestellt.

Gruppe I

Vp. A.H.

V Band	18(15)	25(17)	31(19)	Übgstdn.
1:2	0	0	0	
1:4	62	100	100	
1:8	0	0	0	

Gruppe II

V Band	18(2)	25(4)	31(6)	Übgstdn.
1:2	16	0	0	
1:4	100	100	100	
1:8	0	0	0	

Gruppe III

V Band	18(1)	25(4)	31(6)	Übgstdn.
1:2	0	0	0	
1:4	25	25	100	
1:8	0	0	0	

Gruppe I

Vp. G.S.

V Band	18(15)	27(19)	Übgstdn.
1:2	0	0	
1:4	0	50	
1:8	0	0	

Aus den Wortgruppen II und III wurde von Vp. G.S.
kein Wort richtig erkannt.

Gruppe I

Vp. G.Schw.

V Band	15(16)	23(17)	27(19)	Übgstdn.
1:2	0	0	0	
1:4	0	25	100	
1:8	0	0	0	

Gruppe II

V Band	16(1)	20(3)	23(4)	29(6)	32(7)	Übgstdn.
1:2	0	0	0	0	0	
1:4	0	0	0	100	100	
1:8	0	0	0	0	0	

Gruppe III

V Band	20(1)	29(4)	32(5)	Übgstdn.
1:2	0	0	0	
1:4	0	25	25	
1:8	0	0	0	

Gruppe I

Vp. E.S.

Die Werte gelten nur für $V=1:4 = 9,5 \text{ cm/sec.}$

6(6)	8(8)	10(10)	12(12)	14(14)	16(16)	17(17)	18(18)	Üst.
7,7	25	83	100	100	100	100	100	
0	0	0	100	69	100	100	100	

Gruppe II

8(4)	10(6)	12(8)	14(10)	16(12)	17(13)	18(14)	Üst.
70	100	100	100	100	100	100	
33	50	100	100	100	100	100	

Gruppe III

10(4)	12(6)	14(8)	16(10)	17(11)	18(12)	Übgstdn.
75	100	100	100	100	100	
25	100	100	100	100	100	

Wie das nächste Schaubild (Abb. 14) zeigt, ist auch für die Zahl der richtig erkannten Buchstaben der bekannten Wortgruppen ein Wertgipfel beim Bandgeschwindigkeitsverhältnis 1:4 zu erkennen. - Beim Studium des Zahlenmaterials fällt auf, daß für das Bandgeschwindigkeitsverhältnis 1:8 kein Wort richtig erkannt worden ist; von den Buchstaben ist immerhin noch die Hälfte richtig erkannt worden. Bei einem Bandgeschwindigkeitsverhältnis von 1:2 konnte 1 Wort richtig gedeutet werden, was aber wahrscheinlich Zufall ist.

Die Kurven der vergleichbaren Werte der Gruppen II und III für die Vp. G.S. und G.Schw. wurden weggelassen, da sich keine wesentlichen Unterschiede zu der abgebildeten Kurve zeigen, wie aus den Tabellen entnommen werden kann.

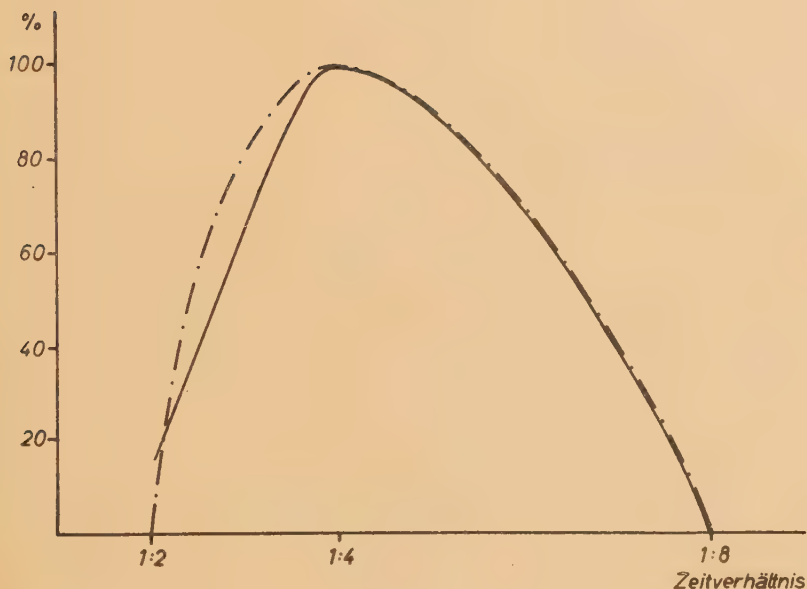


Abb. 14: Vp. A.H. Mittelwerte der richtig erkannten Worte, Gruppe II der bekannten Reihe.

- - - = 18 (2), — = 25 (4) = 31 (6).

5. Vergleich des Übungsfaktors für Buchstaben und Worte

An dieser Stelle mag die Frage auftauchen, ob die Versuchspersonen die Buchstaben dadurch erkennen, daß sie von dem in seiner Gesamtheit erkannten Wort auf dessen Buchstabenzusammensetzung schließen, oder kann ein Wort nur dann erkannt werden, wenn die in Frage kommenden Buchstaben als sichere taktile Empfindung bekannt sind. Das unten stehende

Diagramm für Vp. E.S., in dem Mittelwerte für die im Verlaufe einer Übungsserie richtig erkannten Buchstaben und Worte eingezeichnet sind, gibt Antwort auf diese Frage. Man erkennt deutlich, daß die Werte für richtig erkannte Buchstaben denen für richtig erkannte Worte in ihrer Höhe vorausseilen, bis sie schließlich nach der 12. Übungsstunde gleiche Höhe erreicht haben. Das bedeutet doch nichts anderes, als daß die Versuchspersonen nicht anhand der erkannten Worte die Buchstaben identifizieren, sondern, daß ein Erkennen von Worten erst dann möglich ist, wenn die Versuchspersonen sicher im Erkennen von buchstabenentsprechenden Vibrationseindrücken. - Daher ergeben sich auch identische Werte für richtig erkannte Buchstaben und Worte erst ab der 12. Übungsstunde.

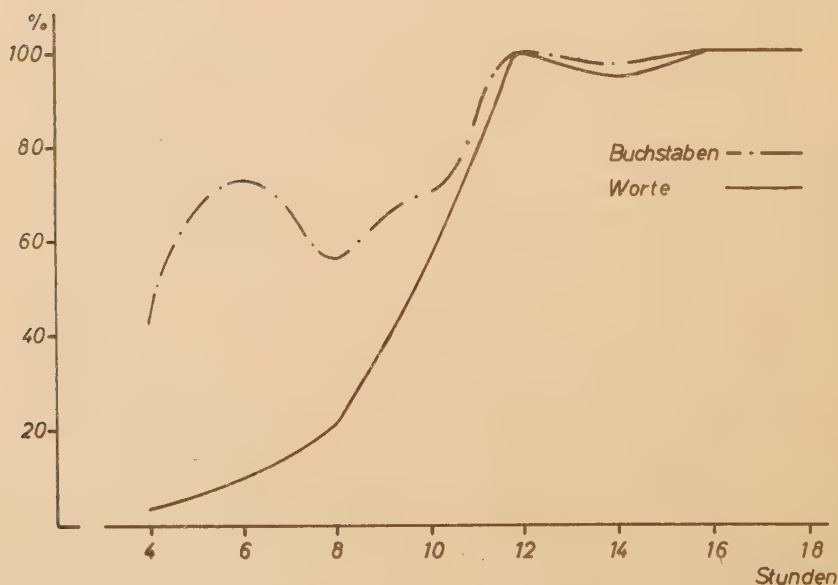


Abb. 15: Vp. E.S. Mittelwerte für richtig erkannte Buchstaben und Worte für die 3 bekannten Reihen bei einer $V=1:4$ bei 9,5 cm/sec. Wiedergabebandgeschwindigkeit.

b) Übungen mit unbekannten Wortreihen

Wenn, wie oben gezeigt werden konnte, jedem Buchstaben eine ganz bestimmte Vibrationsempfindung eigen ist, müßte es doch möglich sein, völlig neue Worte (die sich verständlicherweise aus bekannten Buchstaben zusammensetzen) zu erkennen.

Das gelingt tatsächlich, wie die folgenden Diagramme zeigen werden. - Auch hier zeitigt der Versuch mit dem Zeitverhältnis $V=1:4$ die besten Resultate. Überraschend im Gegensatz zu den Übungen mit bekannten Wortreihen sind die besseren Ergebnisse für das Zeitverhältnis $V=1:2$ bei 19 cm/sec. Wiedergabebandgeschwindigkeit, was wohl durch die größere Aufmerksamkeit der Versuchspersonen erklärt werden kann. Es ist vorstellbar, daß der Ehrgeiz, etwas Neues zu erkennen, die Aufmerksamkeit und die Konzentration der Versuchspersonen steigert.

Vp. A.H.

Gruppe I

Richtig erkannte Buchstaben

V Band 18(15) 32(19) Üst.

1:2 39 66

1:4 83 100

1:8 38 36,5

Richtig erkannte Worte

V Band 18(15) 32(19) Üst.

1:2 0 25

1:4 75 100

1:8 0 0

Gruppe II

V Band 18(2) 20(3) 32(7)

1:2 40 10 49

1:4 40 73 84

1:8 0 6 33,5

V Band 18(2) 20(3) 32(7)

1:2 0 0 16

1:4 0 50 69

1:8 0 0 0

Gruppe III

V Band	20(2)	32(6)	Üst.
1:2	42	50	
1:4	70,5	100	
1:8	0	29	

V Band	20(2)	32(6)	Üst.
1:2	0	0	
1:4	25	100	
1:8	0	0	

Vp. G.S.

Gruppe I

V Band	18(15)	27(19)	Üst.
1:2	14	35	
1:4	71	57	
1:8	28	7	

V Band	18(15)	27(19)	Üst.
1:2	0	0	
1:4	0	50	
1:8	0	0	

Gruppe II

V Band	16(1)	27(5)	Üst.
1:2	50	27	
1:4	67	100	
1:8	33	25	

Gruppe III

V Band	21(3)	Üst.
1:2	0	
1:4	33	
1:8	16	

Worte aus Gruppe II
und III konnten von
G.S. nicht erkannt
werden.

Vp. G.Schw.

Bei dieser Versuchsperson verliefen sämtliche Tests mit Bändern der unbekannten Wortgruppen ergebnislos; es wurden weder Buchstaben noch Worte erkannt.

Das nächste Schaubild zeigt noch einmal den typischen Kurvenverlauf für das Bandgeschwindigkeitsverhältnis, der auch bei den unbekannten Wortreihen keinen Gegensatz zum Verlauf bei bekannten Wortreihen zeigt.

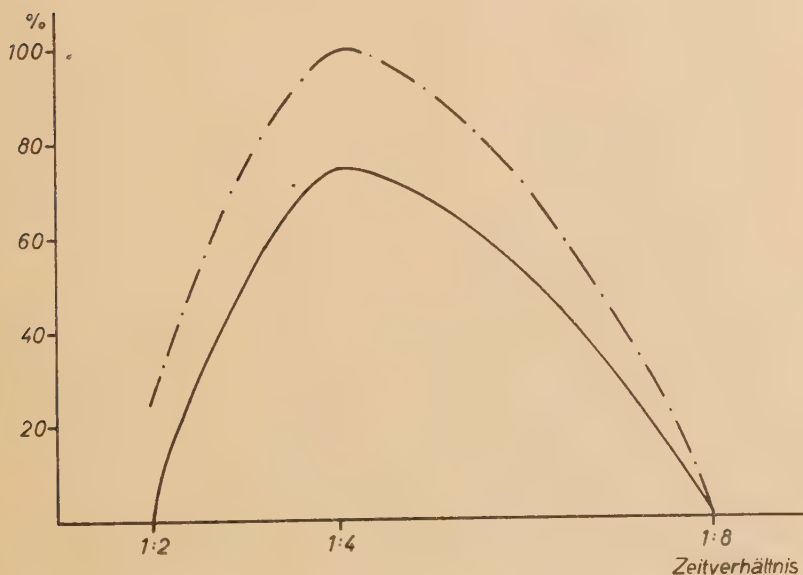


Abb. 16: Prozentzahl der richtig erkannten unbekannten Worte in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Wiedergabe- zur Aufnahmebandgeschwindigkeit nach 18 und 32 Übungsstunden.

Vp. A.H.: richtig erkannte Worte,
Gr. I ————— = 18 (15), - . - . - = 32 (19).

c) Bestimmung des optimalen Verlangsamungsfaktors der
Bandgeschwindigkeit

d. Theoretische Erwartung

Wie schon kurz besprochen, war ein optimaler Verlangsamungsfaktor der Bandwiedergabegeschwindigkeit von $V=1:8$ zu erwarten. Dies war der logische Schluß aus den drei folgenden Überlegungen.

1. Die Schwelle für vertikale und horizontale Hautverschiebung ist frequenzabhängig. Die niedrigste Schwelle für beide Reizformen liegt bei etwa 200 Hz (3 und 6).
2. Frequenzen über 660 Hz können nicht mehr voneinander unterschieden werden (7).
3. Das Zeitauflösungsvermögen der Haut ist ungefähr 8 mal geringer als das des Ohres (8).

Man sollte meinen, das Zeitverhältnis von 1:8 hätte diesen 3 Tatsachen optimal entsprochen, nachdem dadurch der Frequenzumfang der menschlichen Sprache (300-3000 Hz) auf ca. 40-400 Hz heruntertransformiert wurde und damit innerhalb der Schar der niedrigsten Vibrationsschwellen der Haut lag. Weiterhin unterschreiten diese Werte die obere Frequenzgrenze des Vorderarmes (660 Hz) und das Zeitverhältnis entspricht dem 8 mal geringeren zeitlichen Auflösungsvermögen der Haut im Vergleich mit dem Ohr. Die vorliegenden Versuche haben jedoch gezeigt, daß trotz der Gültigkeit dieser Vorstellungen das verhältnismäßig kurze taktile Gedächtnis als zusätzlicher begrenzender Faktor berücksichtigt werden muß.

B. Gemessenes optimales Zeitverhältnis

Nach den ersten 10 Übungsstunden gaben 3 Versuchspersonen unabhängig voneinander an, daß sie erstens Anfang und Ende eines Wortes hätten kaum unterscheiden können, zum anderen des öfteren baten, ein Band zu wiederholen, da sie den Anfang "nicht richtig mitbekommen" hätten, oder aber dieser nicht mehr erinnerlich sei. Demnach war die einzige Möglichkeit, die Resultate zu verbessern, den Verlangsamungsfaktor etwas kleiner zu halten, auch wenn dadurch die Unterschiedsempfindlichkeit verschlechtert werden mußte. So wurden, zunächst nur versuchsweise, die Zeitverhältnisse von $V=1:2$ und $V=1:4$ für die Bandwiedergabe verwendet. Die Ergebnisse zeigten, wie aus dem raschen Anstieg der Mittelwerte für richtig erkannte Buchstaben entnommen werden kann, optimale Versuchsbedingungen für das Zeitverhältnis $V=1:4$, so daß sich weitere tastende Versuche mit anderen Wiedergabegeschwindigkeiten erübrigten. Außerdem fühlten sich die Versuchspersonen bei dieser Wiedergabegeschwindigkeit am sichersten in der Deutung der Vibrationsreize, was bei den Geschwindigkeiten $V=1:8$ (welche als zu langsam) und $V=1:2$ (welche als zu schnell empfunden wurde) nicht der Fall gewesen ist.

Es ist wahrscheinlich, daß das optimale Verlangsamungsverhältnis deshalb $V=1:4$ ist, weil dieses Zeitverhältnis den physiologischen Parametern noch annähernd Rechnung trägt und, was m.E. entscheidend ist, die Leistungsfähigkeit des Kurzzeitgedächtnisses für Vibrationsreize nicht überfordert. In andere Worte gekleidet, kann man auch sagen: zum Erkennen eines Wortes bedarf es einer bestimmten Anzahl von Informationen, die nur unter bestimmten Bedingungen optimal genutzt werden können: der Quotient "nutzbare Information/Informationsbedarf" ist im Idealfall 1. Bei einem Zeitverhältnis von $1:4$ erreicht man $Q=0,7$, während bei $1:2$ $Q=0,5$ und bei $1:8$ $Q=0,4$ wird (vergl. Seite 50 ff).

2. Deutung der Ergebnisse

I. Übungszeitgang

Das auffallendste Merkmal aller Diagramme ist der Wertgipfel für das Zeitverhältnis von $V=1:4$ bei $9,5 \text{ cm/sec.}$, welcher auch den steilen Anstieg der Übungskurven bedingt. Das war für uns sehr überraschend, gingen wir doch von der Annahme aus: die menschliche Stimme hat einen Frequenzumfang von 500 bis 3000 Hz, der "Vibrationssinn" die niedrigste Unterschiedsschwelle bei ungefähr 200 Hz. Einen möglichen technischen Fehler beim Einbau der Untersetzungsmechanik schlossen verschiedene Nachmessungen aus. Dieses Phänomen muß sich also anders erklären lassen. Zunächst wäre festzustellen, daß sich Angaben über Schwellenwerte in der Literatur auf einfache Reize (z.B. isolierter Druckreiz, elektrischer Reiz etc.) beziehen. Da wir es im vorliegenden Falle mit komplexen Reizen zu tun haben, die sich aus einer Orts-, Zeit- und Intensitätskomponente zusammensetzen, müssen wir versuchen, durch Synthese der uns zugänglichen experimentellen Daten zu einer Deutung dieser Ergebnisse zu gelangen. Dazu ist es nötig, auf einige physiologische Tatsachen zurückzugreifen.

Beginnen wir mit den Schwellenwerten. Mehr als viele Worte beleuchtet die von B é k é s y (6) stammende Kurve die Situation. Seine Messergebnisse sind in der folgenden Abb. 17 dargestellt:

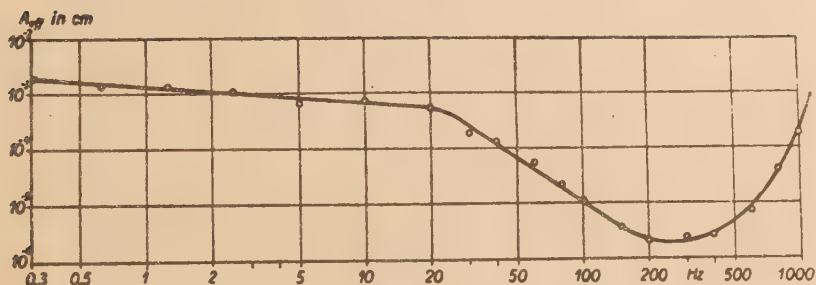


Abb. 17: (6) Frequenzabhängigkeit der Schwelle für (seitliche) Hautverschiebungen der Fingerspitze.

Nach S c h w a n e r (7) liegt die obere Frequenzgrenze für die Vola des Vorderarms bei 660 Hz. Nach Transformation der menschlichen Sprache wird dem Unterarm bei entsprechendem Zeitverhältnis ein Frequenzumfang angeboten, dessen Grenzen nach unten und oben für $V=1:8$ 38 und 380 Hz, für $V=1:4$ 75 und 750 Hz und für $V=1:2$ 150 und 1500 Hz sind. Wir liegen also mit den Reizfrequenzen bei $V=1:8$ streng innerhalb, bei $V=1:4$ fast innerhalb und bei $V=1:2$ um rund 950 Hz über dem Bereich niedriger Schwellen. Bei $V=1:2$ geht sicher ein beträchtlicher Informationsanteil verloren, da von der Haut Frequenzen über 660 Hz nicht mehr unterschieden werden können.

Durch das Abspielen der Bänder im entsprechenden Zeitverhältnis wird nicht nur eine Frequenztransformation erreicht, sondern auch eine Veränderung der Reizzeiten. Da die Vibrationsstärke eines Tonimpulses abhängig ist von seiner Zeitdauer, seien die Verhältnisse in Bezug auf die Reizanklingzeit kurz umrissen. In der folgenden Abb. 18 (9) ist dargestellt, wie die Vibrationsstärke eines Tonimpulses in Abhängigkeit von seiner Zeitdauer zunimmt. Die

Messungen gelten für die Fingerspitze und Vibrationen von 100 Hz, 2,3 neper über der Reizschwelle. Der Endwert wird nach etwa 1,2 sec. erreicht, wobei der Anstieg von der Empfindungsstärke nur wenig abzuhängen scheint.

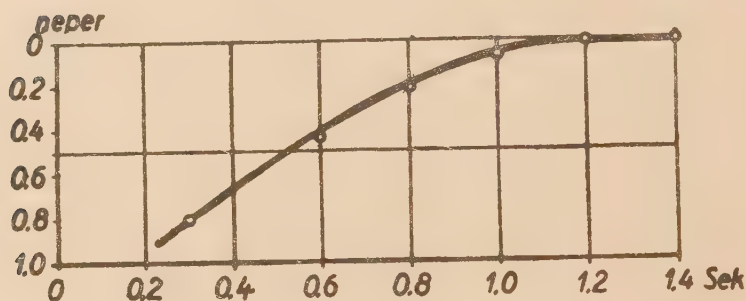


Abb. 18: (9) Anklingzeit der Vibrationsempfindung durch Vergleich mit einem gleich stark erscheinenden Vergleichsdauerreiz derselben Vibrationsfrequenz gewonnen (nach G. v. B é k é s y). Die Anklingzeit liegt in derselben Größenordnung (1 sec.) wie diejenige der Druckempfindung.

Für den zeitlichen Anstieg der Druckempfindung gibt v o n F r e y (14) an, daß "das Maximum der Empfindung (ebenfalls) nach einer Sekunde erreicht wird". Für die Muskelspindel liegen die Werte niedriger.

Aus dem Gesagten läßt sich folgern, daß bei einer Bandgeschwindigkeit von 19 cm/sec. (1:2) wohl deshalb ein sehr flacher Anstieg der Übungskurve zustande kommt, weil die Reizzeit im Verhältnis zur Reizschwelle einfach zu kurz ist, um eine differente Empfindung auszubilden. Das deckt sich auch mit den Angaben der Versuchspersonen ("die Vibrationsempfindung sei noch nicht voll ausgebildet, wenn ein neuer Reiz käme"), wobei allerdings noch

ein psychologisches Moment, wie wir später sehen werden, eine Rolle spielen dürfte.

Es müssen aber noch zwei weitere wichtige Tatsachen in der Diskussion berücksichtigt werden:

Die eine ist die, daß wir uns bei dieser Form der Reizapplikation nicht auf ein kleines Hautareal beschränken, sondern die Reize auf einer immerhin 30 cm langen Strecke geben. Wir reizen also nicht einige wenige Rezeptoren, sondern stets sehr viele, die zudem durch Synapsen miteinander verbunden sind mit folgender Konsequenz: "(6)... aus dieser Skizze ist abzulesen, daß jede synaptische Vermaschung und jede Rezeptorenvermaschung erstens zu einer Schwellensenkung durch Integration über große Areale der Körperoberfläche führen und zweitens die Ortschwelle vergrößern muß".

Der andere Gesichtspunkt ist der, daß auch unser Reizgerät viel größere Dimensionen hat als diejenigen, welche zur Schwellenmessung Verwendung finden. "In Analogie zu der Tatsache, daß bei beidohrigem Hören, zwei zeitlich nacheinander auftreffende Schallreize aus verschiedenen Richtungen bei Laufzeitdifferenzen zwischen 0,00003 und 0,05 sec. der spätere Reiz durch 'Hemmung' unterdrückt wird mit einer Empfindung, als ob der Schall nur aus der Richtung des ersten Reizes käme", findet v o n B é k é - s y (3), daß "auch für die Haut ein ähnlicher Hemmungsmechanismus angenommen werden muß, da bei kurzfristigen Vibrationsreizen das Empfindungsareal räumlich zusammengedrängt erscheint. So wird bei Vibrationserregung der Haut des Armes mit 100 Hz über einen 13 cm langen Stab von 3 mm Durchmesser die ganze Länge des der Haut aufliegenden Stabes erst dann als vibrierend empfunden, wenn der Reiz 0,3 sec. angedauert hat."

Wir können also sagen, daß bei einem Zeitverhältnis von 1:8 wohl die Vibrationen infolge der größeren Anklingzeit stärker empfunden werden als bei $V=1:4$ und $V=1:2$,

daß aber gleichzeitig das Ortsempfinden verschlechtert wird. Nun verstehen wir auch die Angaben der Versuchspersonen, die bei einem Zeitverhältnis von $V=1:8$ nur "Schwingungen und Kitzeln auf der ganzen Länge der Membran verspürten" und erst nach einer Übungszeit von 10 Stunden die Buchstaben "S" und "Sch" an der Dauer der Vibrationsempfindung unterscheiden konnten. Im Gegensatz dazu erkannte Vp. E.S. diese Buchstaben schon nach der 3. Übungsstunde.

Zusammenfassend kann man also sagen: der langsame Anstieg der Übungskurven für die Zeitverhältnisse $V=1:8$ und $V=1:2$ kommt dadurch zustande, daß die Versuchspersonen in beiden Fällen anstatt drei nur zwei Informationsarten verwerten können; bei $V=1:2$ orientiert sich die Versuchsperson hauptsächlich anhand der Orts- und Intensitätsinformation, bei $V=1:8$ vor allem anhand der Zeit- und Intensitätsinformation.

II. Begründung des optimalen Verlangsamungsfaktors

Wenn man von diesen Hemmungsvorgängen am Vibrations-sinn absieht, war im vorigen Abschnitt nur die Rede von den Schwierigkeiten, welche sich dem Erlernen der Vibrationssprache von Seiten der Peripherie, also der Haut, entgegenstellen. Daher soll in diesem Abschnitt untersucht werden, welche Schwierigkeiten sich von Seiten der zentralen Verarbeitung der taktilen Information ergeben.

Zunächst sollen diesbezügliche Äußerungen der Versuchspersonen mitgeteilt werden. Sie geben übereinstimmend an: "Wurden die Bandgeschwindigkeiten verändert, so trat sofort eine Änderung der Aufnahmefähigkeit ein." Bei einer

Geschwindigkeit von $V=1:8$ war die Lokalisation der Vibration wohl noch festzustellen, wenn auch sehr verbreitert, aber der Rhythmus (gemeint ist der Wechsel der Intensitäten) stand mit der automatischen stummen Lautbildung im Geiste derart im Widerspruch, daß eine Verbindung von Rhythmus und Lokalisation kaum möglich war. Besonders ungünstig war die lange Dauer eines Wortes. - Das Gegenteil war bei der Geschwindigkeit von $V=1:2$ der Fall. Die Impulse wechselten so schnell, daß es fast nicht möglich war, die Impulse im Geiste zu Buchstaben bzw. Wortbildern zu verarbeiten. Das Differenzierungsvermögen der Haut fiel rapide. Allerdings muß zu der Geschwindigkeit von $V=1:2$ doch gesagt werden, daß bei genügender Übung Worte, deren Impulse und Rhythmus einem völlig vertraut waren (vor allem Gruppe I) - weil sie am tiefsten in der Erinnerung hafteten - auch bei dieser Geschwindigkeit zu erkennen waren."

Diese Angaben und damit auch das optimale Verlangsamungsverhältnis von $V=1:4$ lassen sich gut begründen, wenn man annimmt, daß das Kurzzeitgedächtnis für Vibrationseindrücke nur innerhalb eines noch näher zu bestimmenden, verhältnismäßig kleinen Zeitraumes voll funktionstüchtig ist. Dieser Zeitraum dürfte etwa 3 Sekunden einschließen. Die Leistungsfähigkeit des Kurzzeitgedächtnisses ist als eine konstante Größe zu betrachten. Soll nun ein Vibrationseindruck richtig gedeutet werden, so ist dies nur dann möglich, wenn er nicht länger als 3 Sekunden dauert; hält er länger an, so werden einfach wichtige Teilinformationen vergessen, eine richtige Deutung ist dann nicht mehr möglich. Zum Erkennen eines bestimmten Wortes ist eine entsprechende Anzahl von Teilinformationen nötig. Dies soll als 'Informationsbedarf' bezeichnet werden. Der Informationsbedarf setzt sich zusammen aus zwei Größen: der mittleren Wortdauer und dem Frequenzumfang der menschlichen Sprache. Anders ausgedrückt heißt das: ein Wort ist nur dann zu erkennen, wenn innerhalb eines bestimmten Zeitraumes, eben

der Wortdauer, eine bestimmte Anzahl von Teilinformationen akustischer, in unserem Falle taktiler Art, gegeben werden. Bei der Eigenart unserer Versuchsanordnung und der Leistungsbegrenzung des Kurzzeitgedächtnisses kann natürlich nur eine bestimmte Anzahl von Teilinformationen, 'die nutzbare Information', verwertet werden. Zur Verdeutlichung der Situation ein Beispiel: ein Wort wird im Zeitverhältnis 1:2 angeboten, dann hat es nun einen Frequenzumfang von 150-1500 Hz. Das Cochlea-Modell kann aber nur einen Frequenzumfang von 40-400 Hz auf der Membran abbilden. Die nutzbare Information hätte also nur einen Frequenzumfang von 250 Hz. Optimale Ergebnisse erhält man also nur dann, wenn der Informationsbedarf gleich groß ist wie die nutzbare Information, der Quotient 'Nutzbare Information/Informationsbedarf' gleich 1 ist. In den folgenden Schaubildern wurde versucht, diese Verhältnisse graphisch darzustellen.

Legende zu

Abb. 19: Das Frequenzband ist als Strecke im logarithmischen Maßstab eingezeichnet. Die unter "a" aufgetragenen Größen sind die nicht transformierten Frequenzen. Auf dieser Skala sind auch die auf dem Cochlea-Modell zur Abbildung gebrachten 40-400 Hz eingezeichnet und stellen bei allen 3 Zeitverhältnissen eine Konstante dar. Unter "b" ist die Frequenz so eingezeichnet, wie sie sich im entsprechenden Zeitverhältnis darstellt, ist aber wie nicht transformiert beschriftet. Das Kurzzeitgedächtnis ist als eine bei allen drei Zeitverhältnissen konstante Strecke aufgetragen, die mittlere Wortdauer im entsprechenden Zeitverhältnis. Größtes Q ($\approx 0,7$) bei 1:4; bei 1:2 wird $Q = 0,5$, bei 1:8 beträgt es 0,4.

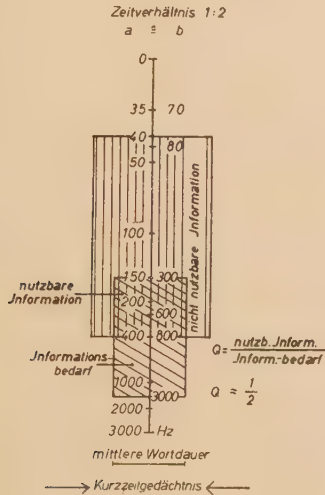
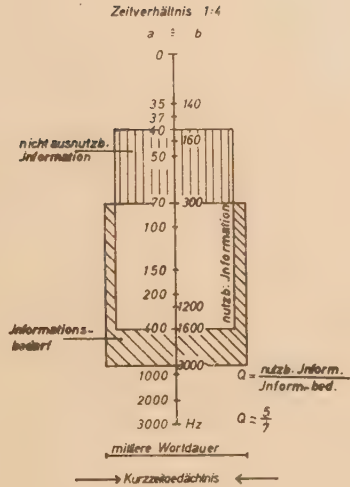
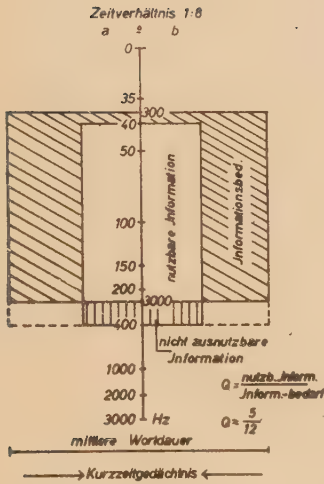


Abb. 19: Legende wie auf der Vorderseite.

Die Leistungsfähigkeit des Kurzzeitgedächtnisses für taktile Informationen ist nicht bekannt (sie ließe sich sehr wohl mittels unserer Versuchsanordnung bestimmen). Daher können die Quotienten, die sich aus den entsprechenden Flächen obiger Schaubilder errechnen, nur orientierenden Charakter haben.

Trotzdem ist deutlich zu erkennen, warum das Zeitverhältnis von $V=1:4$ den optimalen Verlangsamungsfaktor darstellt. Man sieht, daß sich bei diesem Zeitverhältnis der kleinste Informationsverlust (bezeichnet als nicht nutzbare Information) findet. Damit scheint bewiesen, daß das Erkennen von "taktile Sprachinformationen" bei dem Zeitverhältnis $V=1:4$ als dem optimalen Verlangsamungsfaktor am besten möglich ist.

III. Kritischer Vergleich mit anderen Verfahren zur taktile Sprachkommunikation

Beginnen wir mit dem Verfahren nach G e l d a r d (1). Sein System arbeitet mit codierten, verschlüsselten Sprachinformationen, welche auf 5 verschiedene Vibratoren, die am Thorax befestigt werden, verteilt werden. Diese 5 Vibratoren sind so angeordnet, daß einer davon in der Mitte eines Quadrates liegt, dessen Ecken die anderen 4 Vibratoren darstellen. Das Gerät unterscheidet damit 5 Möglichkeiten der Lokalisation des gegebenen Reizes, weiterhin 3 Reizintensitäten und 3 Reizzeiten. Damit steht ein System zur Verfügung, welches mit 45 Elementen zu arbeiten vermag. Verständlicherweise muß jede Information verschlüsselt werden: 89 % der Buchstaben werden der Zeitdauer von 0,1 sec. zugeordnet, die restlichen 11 % der von 0,3 sec. Für Zahlen wurde die Reizzeit von 0,5 sec. reserviert. Die

Variationsmöglichkeiten des Schlüssels mit der Intensitätskomponente ergeben sich von selbst. Der Code ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.

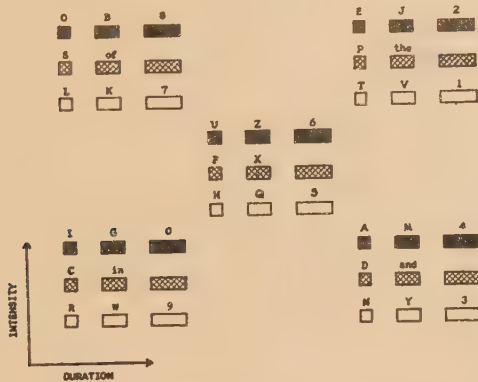


Abb. 20: (1) Codierung der Vibrationssprache nach G e l d a r d . Jede Gruppe von 9 Symbolen ist einem Vibrator zugehörig zu denken, welcher die Intensitäts- und Zeitinformation je 3 mal variiert. Die 5 Vibratoren sind die Träger aller Buchstaben, Zahlen und meist gebrauchten kurzen Worte. - Die am meisten sich wiederholenden Symbole sind den kürzesten Signalen vorbehalten.

Die Ergebnisse, welche sich mit diesem Verfahren erzielen ließen, sind dem folgenden Übungsdiagramm zu entnehmen:

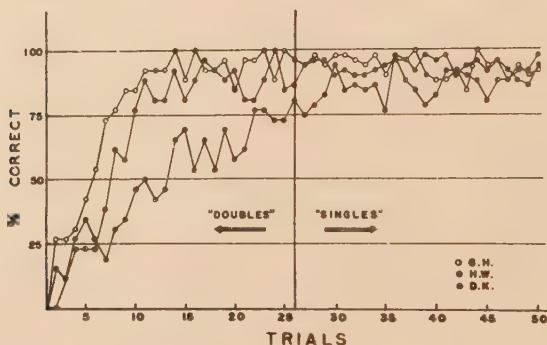


Abb. 21: (1) Übungskurve von 3 Versuchspersonen bei Anwendung des G e l d a r d 'schen Verfahrens. Jeder Versuch bestand aus 2 in nicht alphabetischer Reihenfolge gegebenen Buchstaben. "Doubles" beinhalten 2 mal hintereinander angebotene Buchstaben, um den Sinneseindruck zu verstärken. Die später gegebenen "Singles" erhöhten die Konzentration.

Man sieht, daß mit diesem Verfahren nach etwa 15 Übungsstunden 80-100 % des möglichen Übungserfolges zu erwarten sind. Diese Zahlen entsprechen den Ergebnissen, die sich mit unserer Methode erzielen lassen. Worin sich die beiden Methoden unterscheiden, ist die hohe Übermittlungsgeschwindigkeit, welche sich mit dem G e l d a r d 'schen Verfahren erzielen läßt. Diese liegt bei durchschnittlich 67 Worten pro Minute (beim Morsealphabet bei 30 Worten pro Minute), unter der Voraussetzung, daß die übermittelten Worte schon verschlüsselt vorliegen. Eine Sprachkommunikation ist also nur dann möglich, wenn der

"Gesprächspartner" den Code kennt. Dieses Gerät wurde aber auch nicht zur Verwendung im täglichen Leben gebaut, sondern ist hauptsächlich für Marinetaucher gedacht, und dieser Verwendungszweck macht ja ohnehin verschlüsselte Informationen notwendig. Für dieses Anwendungsgebiet ist das Gerät als ideal anzusehen.

Das Verfahren von F a n t - A w e d s o n (10) arbeitet mit "einer Apparatur für vibratorische 10-Kanal-Übertragung", einer Kombination von taktiler und visueller Informationsübermittlung.

Das Gerät ist nach folgendem Prinzip gebaut: das ganze Sprachfrequenzgebiet wird in 10 Einzelbänder zerlegt, und jedes Band für sich über einen Vibrator einem der 10 Finger zugeleitet. (10) "Die örtliche Zuordnung derartiger Vibrationsmuster läßt sich keineswegs mehr für die Einzelphasen der Wortbilder feststellen, sondern man erhält nur einen komplexen Eindruck vom Rhythmus und einer mehr oder minder ausgeprägten Momentanlage von bestimmten Komponenten des Reizes." - Um diese Schwierigkeiten zu beseitigen, erfolgte die Komplettierung des Gerätes mit einem aus 16 Kanälen aufgebauten System von Leuchtstofflampen, welche (in Reihen angeordnet) ein "spektrales Momentanbild des Eingangssignals geben".

Die Ergebnisse: (10) Nach zweieinhalb Wochen konnte ein Vierzehnjähriger (I.Q. = 107) alle 7 bis dahin geübten Vokale richtig erkennen, die Kinder L (I.Q. = 99) 5 von 7 Vokalen, A (I.Q. = 86) 2 von 7 Vokalen und B (I.Q. = 111) 4 von 7 Vokalen. Die Ergebnisse wurden nach dreiwöchiger Unterbrechung der Versuche ermittelt. - Das richtige Erkennen von 6 Vornamen und 4 Kurzsätzen konnte von allen nach wenigen Sitzungen erlernt werden.

Mit diesem Verfahren lassen sich nach ca. 17 Tagen zwischen 50 und 100 % richtige Angaben erreichen. Mit unserer Methode war ebenfalls nach ca. 16 Stunden ein

vergleichbarer Prozentsatz richtiger Treffer zu verzeichnen. Vom Zeitgang der Versuche her gesehen, besteht bei diesem Verfahren der Vorteil der direkten Sprachübermittlung, d.h. für die Übermittlung ist eine Verlangsamung nicht notwendig. Der Nachteil des Verfahrens dürfte in seinem komplizierten Aufbau zu sehen sein, der von den Versuchspersonen ein Höchstmaß an Aufmerksamkeit verlangt, also sehr rasch zu Ermüdungserscheinungen führen muß.

Und nun der Apparat von R.W. G u e l k e (11):

Der Sprachfrequenzbereich wird auch hier durch ein Bandfilter aufgeteilt. Die Abbildung zeigt im Blockschema das Prinzip des Gerätes. 20 Stahlstäbchen verschiedener Länge werden an einem Magneten befestigt. Den Längen entsprechend, hat jedes dieser Stahlstäbchen seine bestimmte Eigenfrequenz mit einer Bandbreite von 300 Hz.

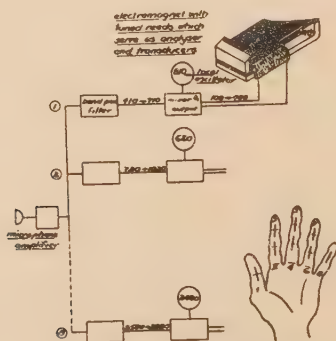


FIG. 2. Block diagram showing principle of apparatus.

No.	Pass band cps	Local oscillating frequency cps	Output cps
1	410 → 710	810	400 → 100 (810, 1220 1520)
2	720 → 1020	920	100 → 400 (620, 1340 1640)
3	1030 → 1330	930	100 → 400 (530, 1960 2260)
4	1340 → 1640	1240	100 → 400 (1240, 2580 2880)
5	1650 → 1950	1350	100 → 400
6	1960 → 2260	1860	100 → 400
7	2270 → 2570	2170	100 → 400
8	2580 → 2880	2480	100 → 400

Abb. 22: Schema der Apparatur von G u e l k e (11).
Erklärung im Text.

Nachdem das gesprochene Wort das Filtersystem, bestehend aus 8 Bandfiltern, passiert hat, wird der entsprechende Frequenzbereich auf einen der 8 Vibratoren übertragen. Auf den Fingern der tastenden Hand ergibt sich, wie aus der Abbildung 23 ersichtlich ist, ein festes Schema der Lokalisationen der einzelnen Frequenzbänder.

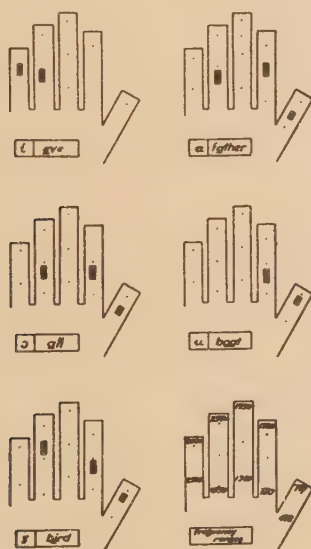


Abb. 23: Erregungsortsmuster bei verschiedenen Vokalen bei dem Verfahren von G u e l k e (11).

Die Übungen mit diesem Gerät wurden mit einem Tauben begonnen. Zunächst sollte die Versuchsperson Vokale im Verband kleiner Worte erkennen. Dies gelang auch nach etwa 12 Tagen mit 80-90 %iger Sicherheit (vergl. dazu obige Abbildung). - Vergleichbare Übungen wurden mit Konso-

nanten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden nach Schwierigkeitsgraden für die einzelnen Buchstaben aufgeschlüsselt. Allgemein konnte R.W. G u e l k e feststellen, daß Konsonanten schwieriger zu erkennen waren als Vokale. Die Gründe hierfür sind (nach G u e l k e): die geringe Sprechkraft ('speech power') der Konsonanten gegenüber den Vokalen, was durch die Eigenheit der englischen Sprache mit weit auseinanderliegenden, für den betreffenden Buchstaben charakteristischen Frequenzbereichen bedingt sein dürfte. Die Dauer der Information ist kürzer als bei Vokalen, so daß hier besonders das mangelhafte Anklingen der vibratorischen Empfindung bei unverzögertem Zeitmuster wirksam wird. Konsonanten werden wahrscheinlich sehr oft nur durch den Effekt erkannt, den sie auf einen Vokal haben (11).

So sind zum Beispiel die Buchstaben 't' und 'k', 'b' und 'd', 's' und 'f', 'k' und 'g' sehr schwer voneinander zu unterscheiden. Die Verhältnisse liegen bei unseren Ergebnissen fast umgekehrt, waren es doch die Konsonanten, welche am leichtesten zu erkennen und zu unterscheiden waren; 'e' und 'ä' ließen sich nur aus dem Zusammenhang heraus erkennen. Dies liegt - neben der genügend langen Anklingzeit - sehr wahrscheinlich daran, daß auf dem Cochlea-Modell die ganze Vielfalt der Teilfrequenzen und, was noch wichtiger ist, die für die einzelnen Konsonanten charakteristischen Frequenzüberleitungen auf die Unterarmhaut übertragen werden können. R.W. G u e l k e (11) äußert zum Schluß seiner Arbeit, daß Konsonanten sicher besser zu erkennen sein müßten, wenn sie auf einem, den Vorgängen im Ohr vergleichbaren Wege "entschlüsselt" würden. Der große Vorteil des G u e l k e 'schen Apparates ist die direkte Sprachübertragung ohne irgendeine Verlangsamung und ohne zwischengeschaltete Speicher- oder "Codierungsmaschinen". (wie sie bei der G e l d a r d 'schen und unserer Methode zur Anwendung kommen müssen).

Abschließend kann man sagen, daß jede taktile Sprachkommunikation erst dann möglich ist, wenn die menschliche Sprache in "hautgerechte" Informationen zerlegt worden ist, also in eine Orts-, Zeit- und Intensitäts-(Frequenz-) Information. Daß keine der aufgezeigten Lösungen bisher als ideal anzusehen ist, geht daraus hervor, daß die Autoren alle sich einen zusätzlichen Informationsapparat über ein weiteres Sinnesorgan zu verschaffen suchen.

Zu unserem eigenen Verfahren sollen zum Schluß noch die folgenden kritischen Bemerkungen und Verbesserungsvorschläge gemacht werden:

Für die Praxis wäre eine Sprachübermittlung bei nicht so stark verzögerter Sprechgeschwindigkeit wünschenswert. Die Ergebnisse, die bei der Bandgeschwindigkeit von 19 cm/sec. (Verlangsamungsfaktor 2) erzielt werden konnten, geben hier zu Hoffnungen Anlaß.

Die verminderte Leistung, die bei dem Zeitverhältnis von $V=1:2$ bisher beobachtet wurde, ist bedingt durch einen Verlust an Information, deshalb, weil dabei auf der Membran des Cochlea-Modells nur noch die Frequenzen zwischen 150 und 400 Hz abgebildet werden. Die Leistung läßt sich nur durch Schaffung einer zusätzlichen Informationsquelle auf die Werte anheben, die für das Zeitverhältnis von $V=1:4$ ermittelt werden konnten. Als zusätzliche Informationsquelle wären schwache elektrische Ströme entsprechender Frequenzen empfehlenswert. Hiermit läßt sich nämlich, wie Albrecht (12) feststellen konnte, eine Vibrationsempfindung leichter hervorrufen als auf mechanischem Wege. Es wurde festgestellt, daß man in einem Bereich von 50-200 Hz elektrische Frequenzunterschiede von 2 % mit Sicherheit zu unterscheiden vermag, wobei das Maximum der Unterschiedsempfindlichkeit bei 200 Hz liegt. Für mechanische Vibrationsstöße liegt dagegen die Unterschiedsempfindlichkeit bei 10 % (12). Außerdem ließe sich durch die zusätzliche elektrische Vibrationsinformation, dadurch daß

sie auf kleinster Fläche appliziert wird, die Ortsschwelle (für mechanische Vibrationen wegen der synaptischen- und Rezeptorenvermaschung vergrößert) verkleinern, und damit die Frequenzunterschiedsempfindlichkeit steigern.

Werden die Informationsverarbeitungsarten, wie sie sich am Vibrationssinn und am Gehör beobachten lassen, miteinander verglichen, so ergeben sich grundlegende Unterschiede in der "Physiologie" dieser beiden Sinne.

K a t s u k i und T a s a k i und D a v i s (13) konnten jüngst das Kontrastproblem beim Gehör lösen. Sie stellten fest, daß durch "systematische Ausnutzung des Prinzips der Erregungshemmung durch den Reiz, in jeder synaptischen Lage der zentralen Hörbahn die Steilheit des Abfalls der Erregbarkeit mit der Entfernung von der optimalen Reizfrequenz verbessert wird". Diese Autoren bewiesen die neurale Ursache der Frequenzkontrastbildung. "(13) Die große Frequenzunterschiedsempfindlichkeit des Gehörs ist also eine Leistung des ZNS und nicht des Ohres, obwohl die Einortstheorie des Hörens uneingeschränkte Gültigkeit hat." Diese für das Gehör spezifische Leistung des zentralen Nervensystems mangelt dem Vibrationssinn, ja dessen Ortsschwelle kann sogar durch die Vermaschungsschaltung seines Rezeptorennetzes vergrößert werden. Diese Minderleistung ließe sich vielleicht durch einen zusätzlichen faradischen Vibrationsreiz für die Vibrationssprache kompensieren.

Sehr wahrscheinlich ließen sich durch die kombinierte mechanisch-elektrische Vibrationsinformation auch die Schwierigkeiten der Vibrationssprache beseitigen, die dadurch entstehen, daß jeder Mensch eine andere Aussprache hat. Dies störte die Versuchspersonen bei unseren Versuchen merklich, da der Vibrationseindruck eines Vokales sehr davon geprägt wird, wie der Konsonant vor diesem Vokal gesprochen wird. Hier würde die zusätzliche elektrische Applikation der typischen Frequenzen bessere Informationsleitungsbedingungen schaffen.

Nicht unwichtig bei der Beurteilung der Verwendbarkeit des Cochlea-Modells in der Vibrationsssprache ist die Frage nach den Ermüdungserscheinungen. In einem Dauerversuch von 2 1/2 Stunden stellte sich nach ca. 1 Stunde ein starker Leistungsabfall ein; die Leistung konnte jedoch durch dreifache Verstärkung der Vibrationsreize wieder auf die Normalleistung angehoben werden. Danach war kein nennenswerter Leistungsabfall mehr festzustellen.

Es ist fast selbstverständlich, daß nach dem bisher Gesagten die Frage nach der Verwendungsmöglichkeit dieses Verfahrens zur taktilen Sprachkommunikation bei taubstummen Menschen auftauchen muß, zumal ja diese über eine größere Empfindlichkeit für taktile Reize verfügen als der Normalhörende (6 und 11). Versuche in dieser Richtung wurden von uns mit einem Mädchen auch begonnen, das nur noch über geringe Hörreste verfügt. Leider mußten diese Versuche schon nach einigen Übungsstunden eingestellt werden, da die Versuchsperson uns ihre weitere Mithilfe versagte. Deshalb ist es auch nicht möglich, an dieser Stelle darüber Aussagen zu machen, wie sich ein Taubstummer mit unserem Verfahren zurechtfindet. Sicher ist es aber eine beträchtliche Hilfe beim Taubstummensprechunterricht, denn das Cochlea-Modell ist wie kein anderer der beschriebenen Apparate in der Lage, dem Tauben einen Eindruck vom zeitlichen Ablauf eines gesprochenen Wortes zu vermitteln. Doch diese Fragen werden erst neue Versuchsreihen beantworten können.

E. Zusammenfassung

1. In der vorliegenden Arbeit konnte anhand von 671 Einzelversuchen an vier Versuchspersonen im Alter von 23 bis 27 Jahren gezeigt werden, daß eine taktile Sprachkommunikation über die Haut mittels des B é k é s y ' schen Cochlea-Modells nach dem von K e i d e l angegebenen Verfahren möglich ist. Optimale Resultate erhielten wir bei einer Bandwiedergabegeschwindigkeit von 9,5 cm/sec., was einem Verlangsamungsfaktor von 4 gegenüber der Bandaufnahmegeschwindigkeit entspricht. Unbekannte Worte konnten im günstigsten Falle nach 18 Übungsstunden zu 83 %, nach 32 Übungsstunden zu 100 % richtig erkannt werden. Verlangsamungsfaktoren von 8 und 2 geben eindeutig schlechtere Resultate.

2. Die Gründe für das Optimum des Verlangsamungsfaktors Aufnahme-Wiedergabe-Bandgeschwindigkeit bei 4 werden untersucht. Als Hauptgrund wird ein verhältnismäßig schlechtes taktilen Gedächtnis angesprochen, das in den vorliegenden Untersuchungen einen Zeitraum von etwa 3 Sekunden umfaßte.

3. Vor- und Nachteile anderer bekannter Verfahren zur Sprachkommunikation über die Haut werden diskutiert und mit dem hier beschriebenen Verfahren verglichen.

4. Als wünschenswerte Verbesserung des Verfahrens wird die zusätzliche Gabe einer elektrischen taktilen Information im Sprachrhythmus neben der vibratorischen empfohlen.

F. L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

=====

- (1) Geldard, Frank A.: Adventures in Tactile Literacy. The American Psychologist, Vol. 12, No.3, March, 1957.
- (2) Békésy, G.v.: "Über die Vibrationsempfindung". A.Z. 4/1939/316.
- (3) Békésy, G.v.: Human Skin Perception of Traveling Waves Similar to Those on the Cochlea. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.27, No.5, 830-841, September, 1955.
- (4) Keidel, W.D.,
Keidel, U.O. u.
Kiang, N.Y.S.: Cortical and peripheral responses to vibratory stimulation of the cat's whiskers. Quart.Progress Rep., Res.Lab. Electronics, M.I.T., July, 15, 1957, Pp.135-139.
- (5) Newman, H. u.
Kendall, B.: Proc.Soc.exper.Biol.a.Med. 35/1936/273.
Ref.: Ber.üb.d.ges.Physiolog. 101/1939/307.
Quantitative determination of vibratory sensibility. Entnommen: Diss. Albrecht, Schwellenänderung von Vibrations-, Schmerz- und Drucksinn nach faradischen Verdeckungsreizen. Erlangen 1952.
- (6) Keidel, W.D.: Vibrationsreception - Der Erschütterungssinn des Menschen. Erlanger Forschungen, Reihe B: Naturwissenschaften, Band 2, 1956.
- (7) Schwaner, R.: Die Prüfung der Hautsensibilität vermittelt Stimmgabeln bei Gesunden und Kranken. Diss. Marburg 1890.
- (8) Keidel, W.D.: Note on a new system for vibratory communication. Perceptual and Motor Skills, 1958, 8, 250. Southern Universities Press 1958.

- (9) Békésy, G.v.: Über die Vibrationsempfindung.
A.Z. 4/1939/316.
- (10) Rösler, Günter: Über die Vibrationsempfindung.
Literaturdurchsicht und Untersuchungen im Tonfrequenzbereich.
Sonderdruck aus Band IV/4,
1957 der "Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie".
- (11) Guelke, R.W. and R.M.J. Huyssen: Development of Apparatus for the Analysis of Sound by the Sense of Touch. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol.31, No.6, June, 1959.
- (12) Albrecht, J.: Schwellenänderung von Vibrations-, Schmerz- und Drucksinn nach faradischen Verdeckungsreizen.
Diss. Erlangen 1952.
- (13) Keidel, W.D.: Neuere Ergebnisse der Elektro-Physiologie des Hörens. Sonderdruck aus: Theorie und Praxis der Hörgeräteanpassung sowie Probleme der Begutachtung, herausgegeben von Prof.Dr.med. Dipl.-Ing.K.Schubert, Bonn. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1960.
- (14) Frey, M.v.: "Physiolog. Versuche über das Vibrationsgefühl".
Zsch.f.Biol. 65/1915/417.

Lebenslauf

Am 19. Januar 1935 wurde ich in Saulgau/Württ. geboren. Nach vierjährigem Besuch der Volksschule und neunjährigem Besuch der Oberschule bestand ich am 29. März 1954 das Abitur. Im Sommer-Semester 1954 begann ich das Studium der Medizin an der Universität Freiburg/Breisgau. Nach vier Semestern wechselte ich die Universität und immatrikulierte mich an der Universität Erlangen. An der gleichen Universität legte ich die ärztliche Prüfung am 8. Juli 1960 ab. Zur Zeit betätige ich mich als Medizinalassistent in Saulgau.

Herrn Prof. Dr. W.D. K e i d e l möchte ich
für die freundliche Überlassung des Themas und für
die Übernahme des Referates danken.

Gedruckt bei
LUDWIG MÜLLER
ERLANGEN